

CARLOS EDUARDO PAGHI

**APERFEIÇOAMENTO DO ANEMÔMETRO A
EFEITO PELTIER**

**FLORIANÓPOLIS
2002**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APERFEIÇOAMENTO DO ANEMÔMETRO A
EFEITO PELTIER**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

CARLOS EDUARDO PAGHI

Florianópolis, março de 2002

APERFEIÇOAMENTO DO ANEMÔMETRO A EFEITO PELTIER

Carlos Eduardo Paghi

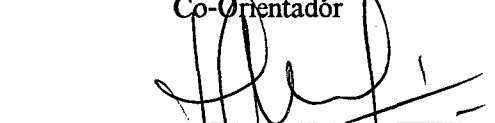
'Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Instrumentação Eletrônica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.'



Saulo Güths, Dr
Orientador



Márcio Cherem Schneider, Dr
Co-Orientador

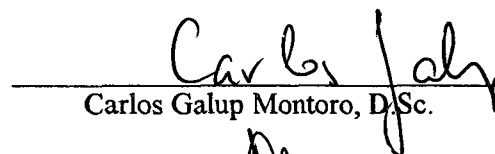


Edson Roberto de Pieri, Dr
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

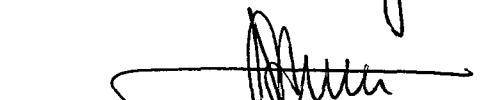
Banca Examinadora:



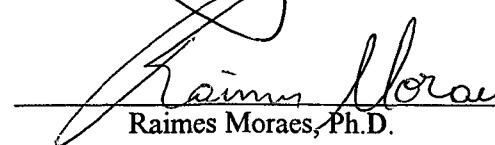
Márcio Cherem Schneider, Dr
Presidente



Carlos Galup Montoro, D.Sc.



José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr



Raimes Moraes, Ph.D.

À Deus,
e aos meus pais José Carlos e Maria Cecília.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo apoio constante e incondicional a tudo o que pode me aperfeiçoar como ser humano.

Ao professor Saulo Güths, por acreditar no meu crescimento profissional e pela liberdade de aprendizagem e ações que proporciona.

Aos professores Márcio Cherem Schneider e Carlos Galup Montoro, pelas contribuições para o meu trabalho, minha formação técnica e pela empolgação ao verem o trabalho concluído.

Aos amigos do LMPT, por todos os longos anos de convivência.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APERFEIÇOAMENTO DO ANEMÔMETRO A EFEITO PELTIER

Carlos Eduardo Paghi

Março/2002

Orientador: Saulo Güths, Dr.

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica.

Palavras-Chave: Anemometria, Termoeletricidade.

Número de Páginas: 102

RESUMO: Neste trabalho apresenta-se o aperfeiçoamento do anemômetro a efeito Peltier apresentado por Güths[1]. Para isso foram alteradas tanto as dimensões dos sensores como a eletrônica necessária ao dispositivo. A modificação do método de otimização dos sensores ocasionou um aumento na sensibilidade proporcionada pelo instrumento; a evolução na eletrônica possibilitou a compensação em temperatura, maior flexibilização na geração dos sinais envolvidos no anemômetro e diminuição da complexidade de construção. O dispositivo obtido mostrou-se capaz de medir velocidades entre 5 cm/s e 80 cm/s.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

IMPROVEMENT OF THE PELTIER EFFECT ANEMOMETER

Carlos Eduardo Paghi

March/2002

Advisor: Saulo Güths, Dr.

Concentration Area: Electronic Instrumentation.

Keywords: Fluid flow measurement, Thermoelectricity.

Number of Pages: 102

ABSTRACT: In this work we present some improvements into the anemometer based on Peltier effect, initially proposed by Güths [1]. The improvements include both the sensor dimensions and the electronics as well. The optimized dimensions of the sensor allow increased sensitivity; the new electronics circuits, more flexible and less complex, allow temperature compensation. A prototype instrument has been built and demonstrated to measure gas speeds from 5 cm/s to 80 cm/s.

Sumário

Introdução.....	1
Capítulo 1: Revisão bibliográfica.....	2
1.1 Medidores de pás.....	2
1.2 Tubos de Pitot.....	2
1.3 Termo-anemômetros.....	3
1.4 Anemômetros a efeito Doppler.....	4
1.5 Rotâmetros.....	5
Capítulo 2: Efeitos térmicos presentes no sensor.....	7
2.1 Efeito Seebeck.....	7
2.2 Efeito Peltier.....	8
2.3 Efeito Thomson.....	8
2.4 Efeitos termoelétricos em circuitos a eletrodos depositados.....	9
2.4.1 Poder termoelétrico.....	10
2.4.2 Efeito Seebeck.....	12
2.4.3 Efeito Peltier.....	12
2.5 Fenômenos de transferência de calor no sensor.....	13
2.5.1 Radiação.....	13
2.5.2 Condução.....	14
2.5.3 Convecção.....	15
Capítulo 3: O anemômetro a efeito Peltier.....	17
3.1 Princípio de funcionamento.....	17
3.2 Compensação do efeito de gradiente de temperatura.....	18
3.3 Fonte de corrente.....	20
3.4 Detecção do sinal Seebeck.....	22
3.5 Compensação de temperatura.....	26
3.6 Controle das chaves e aquisição dos sinais.....	26
Capítulo 4: Otimização dos parâmetros dimensionais do sensor.....	30
4.1 Estudo analítico do anemômetro a efeito Peltier.....	30
4.2 Resultados das simulações.....	35
Capítulo 5: Resultados experimentais.....	47
5.1 Equipamento para a calibração do anemômetro a efeito Peltier.....	47
5.2 Condições experimentais.....	49
5.2.1 Sensores utilizados.....	49

5.2.2 Corrente injetada no sensor.....	50
5.3 Curva de resposta do anemômetro com os sensores 1 e 2.....	51
5.4 Estabilidade das medições ao longo do tempo.....	53
5.5 Medição da histerese.....	53
5.6 Avaliação da perturbação causada pelo efeito Joule.....	54
5.7 Compensação em temperatura para o sensor 2.....	56
5.8 Comparação entre valores experimentais e teóricos.....	60
Conclusão.....	65
Anexo 1 - Fabricação do sensor.....	67
Anexo 2 - Códigos para simulação em MATLAB.....	70
Anexo 3 - Comunicação entre o anemômetro e o PC.....	83
Anexo 4 - Códigos para o microcontrolador ATmega 103.....	85
Referências Bibliográficas.....	101

Lista de Figuras

Figura 1: Anemômetro de pás.....	2
Figura 2: Medição da velocidade através de um tubo de Pitot.....	3
Figura 3: Anemômetro laser a efeito Doppler.....	5
Figura 4: Medidor de vazão do tipo rotâmetro.....	6
Figura 5: Efeito Seebeck na junção de dois materiais.....	7
Figura 6: Efeito Peltier na junção de dois materiais.....	8
Figura 7: Efeito Thomson em um condutor.....	9
Figura 8: Circuito bimetálico a eletrodos depositados.....	10
Figura 9: Célula do termopar plaqueado.....	11
Figura 10: Variação do poder termoelétrico de um termopar plaqueado em função da espessura do depósito (fio de constantan com diâmetro de 25 μm , depósito de cobre).....	11
Figura 11: Efeito Seebeck em um termopar plaqueado.....	12
Figura 12: Efeito Peltier em um termopar plaqueado.....	12
Figura 13: Exemplo unidimensional de condução de calor.....	15
Figura 14: Efeito Peltier em uma célula do sensor.....	17
Figura 15: Alteração na temperatura do sensor devido a velocidade do ar.....	17
Figura 16: Períodos de injeção de corrente e leitura do sinal Seebeck.....	18
Figura 17: Efeito de um gradiente de temperatura na medição do sinal Seebeck.....	19
Figura 18: Inversão do sentido da corrente injetada.....	20
Figura 19: Ciclo completo de injeção de corrente e medição do efeito Seebeck.....	20
Figura 20: Fonte de corrente positiva.....	21
Figura 21: Fonte de corrente negativa.....	21
Figura 22: Fonte de corrente utilizada no anemômetro.....	22
Figura 23: Circuito de amplificação da tensão obtida por efeito Seebeck.....	23
Figura 24: Sinal típico na saída do amplificador.....	24
Figura 25: Retificador de precisão.....	25
Figura 26: Filtro com $f_{\text{corte}} = 15 \text{ Hz}$	25
Figura 27: Compensação de temperatura.....	26
Figura 28: Placa de experimentação STK300.....	28
Figura 29: Controle das chaves, aquisição dos sinais e comunicação serial.....	28
Figura 30: Deslocador de nível.....	28
Figura 31: Temporizações supridas pelo microcontrolador.....	29
Figura 32: Parâmetros dimensionais do sensor.....	30

Figura 33: Fluxo de calor na junção.....	31
Figura 34: Estrutura do sensor.....	36
Figura 35: Tensão Seebeck em função de δ ($d = 25 \mu\text{m}$).....	36
Figura 36: δ ótimo em função de $\ln l_1$ e l_1	37
Figura 37: Variação de δ ótimo em função de I	37
Figura 38: Variação de δ ótimo em função da velocidade do ar.....	38
Figura 39: VSensor em função de $\ln l_1$ e l_1	39
Figura 40: Sensibilidade em função de $\ln l_1$ e l_1	41
Figura 41: Corte lateral de uma célula do sensor.....	42
Figura 42: Potência dissipada no sensor em função de $\ln l_1$ e l_1	43
Figura 43: Acréscimo na temperatura média do sensor devido ao efeito Joule.....	44
Figura 44: Variação de θ_{Joule} com a velocidade.....	45
Figura 45: β em função de $\ln l_1$ e l_1	46
Figura 46: Sistema utilizado para a calibração do anemômetro.....	47
Figura 47: Rotâmetros.....	48
Figura 48: Banho termostatizado.....	48
Figura 49: Dimensões da canalização interna.....	49
Figura 50: Montagem do sensor.....	50
Figura 51: Temporizações dos ciclos de injeção de corrente e leitura do sinal Seebeck.....	50
Figura 52: Períodos totais de injeção de corrente positiva e negativa.....	51
Figura 53: Tensão de saída em função da velocidade variando-se I (sensor 1).....	42
Figura 54: Tensão de saída em função da velocidade variando-se I (sensor 2).....	42
Figura 55: Sensibilidade dos sensores 1 e 2 em função da velocidade.....	53
Figura 56: Estabilidade das medidas, sensor 2.....	54
Figura 57: Avaliação da histerese do anemômetro (sensor 2).....	54
Figura 58: Rotação do sistema de calibração.....	55
Figura 59: Avaliação do efeito Joule (sensor 2).....	56
Figura 60: Dependência da tensão de saída com a temperatura do ar (sensor 2).....	57
Figura 61: M_2 em função da temperatura (sensor 2).....	57
Figura 62: M_1 em função da temperatura (sensor 2).....	58
Figura 63: M_0 em função da temperatura (sensor 2).....	58
Figura 64: Resultado da calibração (sensor 2).....	59
Figura 65: Forma de fixação do sensor no bocal.....	60
Figura 66: Comparação entre as duas correlações apresentadas ($d = 25 \text{ mm}$).....	63

Figura 67: Comparação entre valores teóricos e experimentais (sensor 2).....	64
Figura 68: Formação das células através da aplicação de esmalte.....	67
Figura 69: Montagem do banho eletrolítico.....	68
Figura 70: Fio de referência, corte lateral.....	68
Figura 71: Resistência do fio de referência em função de δ	69
Figura 72: Diagrama da comunicação entre o anemômetro e o PC.....	83
Figura 73: Rotina principal.....	85
Figura 74: Rotina para inicialização da UART.....	90
Figura 75: Rotina para inicialização do temporizador.....	90
Figura 76: Rotina para inicialização do conversor A/D.....	92
Figura 77: Tratamento da interrupção gerada pelo temporizador.....	95
Figura 78: Tratamento da interrupção gerada pela recepção de um byte.....	97
Figura 79: Tratamento da interrupção gerada pelo envio de um byte.....	98
Figura 80: Sub-rotina para leitura do conversor A/D.....	99
Figura 81: Sub-rotina para enviar bytes.....	100

Lista de Tabelas

Tabela 1: Poder termoelétrico.....	11
Tabela 2: Condutividade térmica dos materiais usados no anemômetro.....	34
Tabela 3: Dimensões para maximização da sensibilidade a 20 cm/s ($d = 25 \mu\text{m}$ e $l_{\text{total}} = 2 \text{ cm}$).....	40
Tabela 4: Resistividade dos materiais usados no anemômetro.....	42
Tabela 5: Comparação entre as maximizações de sensibilidadeSensor e β	45
Tabela 6: Dimensões aproximadas dos sensores utilizados.....	49
Tabela 7: Constantes para a equação de Zhukauskas.....	62

Lista de Variáveis

- V : diferença de potencial [V];
- V_T : tensão na saída do sensor de temperatura [V];
- V_{seeb} : tensão em uma célula do sensor do anemômetro a efeito peltier [V];
- V_{sensor} , V_{saida} : tensão no sensor do anemômetro a efeito peltier [V];
- V_{un} : tensão no sensor para u_n [V];
- I : intensidade da corrente elétrica [A];
- σ_n : condutividade elétrica [S/m];
- ρ_n : resistividade elétrica [Ω m];
- T , T_n : temperatura [K];
- $\theta_{junção}$: temperatura na junção do termopar plaqueado [K];
- $\theta_{JouleMédio}$: acréscimo na temperatura média do sensor devido ao efeito Joule [$^{\circ}$ C];
- A_n : área transversal [m^2];
- S_{npl} : seção transversal da região não plaqueada [m^2];
- S_{pl} : seção transversal da região plaqueada [m^2];
- P_{pl} : perímetro da região plaqueada [m];
- P_{npl} : perímetro da região não plaqueada [m];
- L : comprimento [m];
- L_{total} : comprimento do sensor do anemômetro a efeito Peltier [m];
- L_{cel} : comprimento de uma célula do sensor do anemômetro a efeito Peltier [m];
- l_{pl} : comprimento da região plaqueada de uma célula do sensor do anemômetro [m];
- l_{npl} : comprimento da região não plaqueada de uma célula do sensor do anemômetro [m];
- $n_{células}$: número de células do sensor do anemômetro a efeito Peltier;
- d : diâmetro do sensor [m];
- δ : espessura do material de depósito [μ m];
- $\delta_{ótimo}$: espessura do material de depósito que maximiza a tensão produzida pelo sensor [μ m];
- α_n : poder termoelétrico de um material [V/K];
- a_n : constante da reta do poder termoelétrico de um material em função da temperatura [μ V/K];
- b_n : coeficiente linear da reta do poder termoelétrico de um material em função da temperatura [μ V/K²];
- λ , λ_n : condutividade térmica de um material [W/mK];

q''_n : fluxo de calor avaliado na direção n [W/m²];
 q_{Joule} : Potência dissipada no sensor por efeito Joule [W];
 $\phi_{Peltier}, q_{Peltier}$: fluxo de calor gerado ou absorvido por efeito Peltier [W];
 q_{npl} : fluxo de calor para a região sem depósito [W];
 q_{pl} : fluxo de calor para a região com depósito [W];
 $\phi_{Thomson}$: fluxo de calor gerado ou absorvido por efeito Thomson [W];
 σ : constante de Stefan-Boltzmann $\left(\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right)$;
 α : absortividade de uma superfície;
 ε : emissividade de uma superfície;
 h : coeficiente de troca de calor por convecção [W/m²K];
 u, u_n : velocidade do ar [m/s];
 g : gravidade [m/s²];
 β : coeficiente de expansão térmica do gás [T⁻¹];
 ν : viscosidade cinemática do gás [m/s²];
 C : coeficiente de arraste;
 Pr : número de Prandtl;
 Prs : número de Prandtl avaliado para a temperatura da superfície do cilindro;
 Re : número de Reynolds;

Introdução

Define-se por anemômetro o instrumento que se destina a medir a velocidade do ar. Há vários instrumentos capazes de medir a velocidade do ar; eles diferem entre si quanto ao princípio de medição, áreas de aplicação, etc. Dentre essas aplicações, há o estudo de fenômenos térmicos onde a convecção natural está presente (aquecedores e refrigeradores domésticos, trocadores de calor industriais, etc), nos quais as velocidades envolvidas são baixas e as mudanças da sua amplitude lentas. Alguns dos tipos de anemômetro existentes poderiam ser indicados para esses casos como, por exemplo, o anemômetro laser e o de fio quente. O anemômetro laser, apesar de sua elevada precisão e sensibilidade, necessita da injeção de impurezas no fluxo de ar, o que pode alterar as características do fenômeno de troca de calor. Já o anemômetro a fio quente possui limitações para medições em baixas velocidades; para efetuá-las são necessários circuitos de controle e calibrações complexas. Para cobrir a área de aplicações em baixas velocidades (abaixo de 0.5 m/s), Güths [1] tornou possível a construção de um novo tipo de anemômetro baseado no efeito Peltier. Embora o dispositivo tenha apresentado bons resultados, a sua utilização estava prejudicada pelo elevado nível de ruído presente no sinal de saída e por sua compensação de temperatura ineficiente. Esta é a proposta deste trabalho: aperfeiçoar o dispositivo proposto por Güths [1] ao melhorar a relação sinal / ruído e a compensação de temperatura. Propôs-se também a construção do anemômetro com a utilização de um microcontrolador, a fim de que a eletrônica necessária à sua construção fosse reduzida.

Esse trabalho foi dividido de forma que a compreensão do instrumento seja gradual; no Capítulo 1 é feita uma revisão bibliográfica a qual mostra alguns tipos de anemômetro existentes; no Capítulo 2 explica-se os fenômenos térmicos presentes no sensor; no Capítulo 3 mostra-se os circuitos montados para o protótipo; no Capítulo 4 mostra-se a determinação das dimensões do sensor; no Capítulo 5 apresenta-se os resultados experimentais obtidos. Após esse item seguem a conclusão sobre o trabalho efetuado e os anexos.

Capítulo 1: Revisão bibliográfica

A anemometria é um importante campo de estudos com aplicações em diversas áreas, tais como biometria, indústria, conforto humano, etc. Ela consiste no desenvolvimento de instrumentos que forneçam a velocidade ou a vazão do ar. Ao instrumento que mede a velocidade do ar dá-se o nome de anemômetro, sendo que há diferentes tipos desses instrumentos. Alguns desses tipos [2], [3] são dados a seguir.

1.1 Medidores de pás

São compostos de um número de pás fixadas em braços radiais que são montados em um eixo comum (Figura 1). O eixo é montado em mancais de pequena fricção e sua velocidade de rotação pode ser determinada usando-se fotocélulas, engrenagens e transdutores capacitivos acoplados ao sistema de leitura. Medem velocidades de 0,25 m/s a 50 m/s, em condições geralmente próximas à do ambiente. Apesar do desgaste afetar a calibração inicial e de serem bem menos precisos do que outros medidores, eles são bem mais robustos que anemômetros de fio quente e são mais facilmente acoplados a sistemas elétricos de leitura do que os tubos de Pitot.



Figura 1: Anemômetro de pás

1.2 Tubos de Pitot

O tubo de Pitot consiste em um tubo que mede a diferença de pressão que existe em suas

extremidades (Figura 2). Em uma das extremidades mede-se a pressão causada pela velocidade do ar (pressão local estática mais a pressão dinâmica) e na outra a pressão ambiente (pressão local estática). Devido à essa diferença de pressões o fluido que preenche o tubo desloca-se uma certa altura h , a qual é correlacionada com a velocidade do fluido.

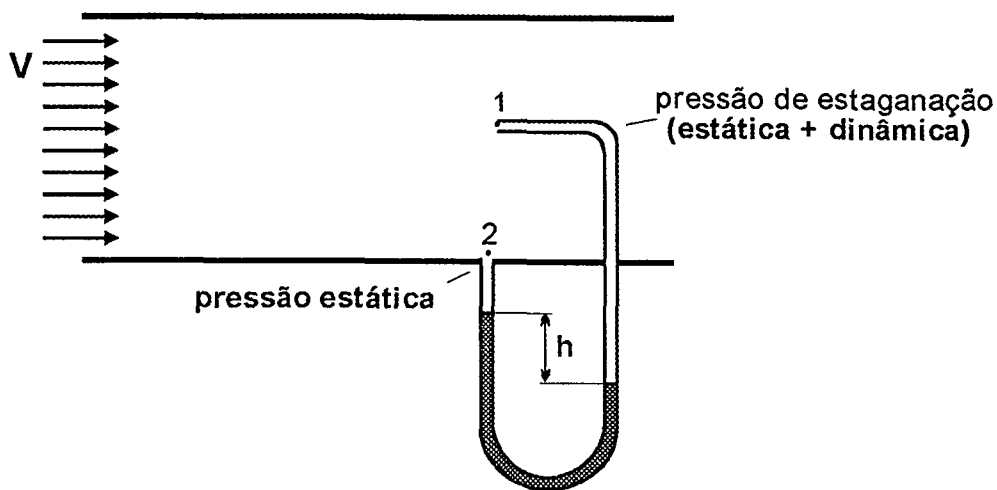


Figura 2: Medição da velocidade através de um tubo de Pitot

Sua faixa de utilização é de 1 m/s a 60m/s. É largamente utilizado em mecânica dos fluidos, sendo que existem diversas geometrias para os tubos. Esse instrumento apresenta uma grande vantagem: não necessita de calibração. Tomadas as devidas preocupações na construção, pode-se aplicar as leis da mecânica dos fluidos (equação de Bernouli) e extrair o valor da velocidade a partir da diferença de pressão medida. Por esse fato é considerado o instrumento padrão. No entanto, possui a desvantagem de que a pressão diferencial para baixas velocidades é pequena, prejudicando a medição.

1.3 Termo-anemômetros

Os anemômetros do tipo térmico são baseados na troca de calor entre o elemento sensor e o ar. O elemento sensor mais comum é um fio ou um filme metálico aquecido e suspenso entre dois suportes.

Existem diferentes técnicas para relacionar a velocidade do ar e o sinal de saída, entre elas:

- Corrente ou tensão constante [4];
- Temperatura constante [5];
- PWM [6], [19].

No primeiro caso uma corrente constante é aplicada ao fio e a sua temperatura é obtida através da sua resistência elétrica. Relaciona-se então a temperatura do fio com a velocidade do ar. No segundo caso mantém-se a temperatura do sensor constante e relaciona-se a velocidade do ar com a corrente necessária para aquecê-lo. O anemômetro do tipo PWM é bem mais recente. Utilizam basicamente a técnica de controle de temperatura; no entanto, ao invés de controlar a amplitude da corrente que passa pelo sensor, altera-se a largura dos seus pulsos. Tem como vantagem maior linearidade e maior facilidade de digitalização do sinal de saída, já que relaciona-se a velocidade do ar com a largura dos pulsos.

Os anemômetros de fio quente têm como vantagem, em relação aos mecânicos, não necessitar de partes móveis, tamanho reduzido e maior sensibilidade para baixas velocidades. No entanto, são frágeis e suas características, para fios de diâmetro reduzido, são afetadas pela deposição de pó e outras contaminações superficiais. Uma forma de contornar parcialmente as alterações das características é recobrir o fio com um tubo de sílica. Essa cobertura facilita a remoção da poeira do sensor, proporcionando uma calibração que permanece constante por períodos indefinidos, ao invés dos dias ou mesmo horas dos sensores descobertos. Entretanto, a sensibilidade e a velocidade de resposta são diminuídas.

Esses instrumentos são usados para velocidades entre 0,1 m/s a 500 m/s.

1.4 Anemômetros a efeito Doppler

Baseiam-se no princípio de que quando uma onda luminosa ou sonora proveniente de um corpo móvel atinge um observador parado, a sua frequência é diferente da qual foi emitida. Emitindo-se então uma onda de uma fonte estacionária, cuja frequência é conhecida, e medindo-se a frequência dessa onda após ela ser refletida ou dispersada por partículas em movimento no ar, obtém-se a indicação da velocidade.

Para o caso da onda ser luminosa utiliza-se um raio laser (Figura 3), o qual tem a propriedade de ser estreito, monocromático e de alta intensidade. Sua grande precisão torna-o útil como instrumento padrão. No entanto, a fonte de laser e o equipamento de medida elétrica são mais complexos do que em outros métodos, além de ser necessário injetar partículas sólidas no fluxo.

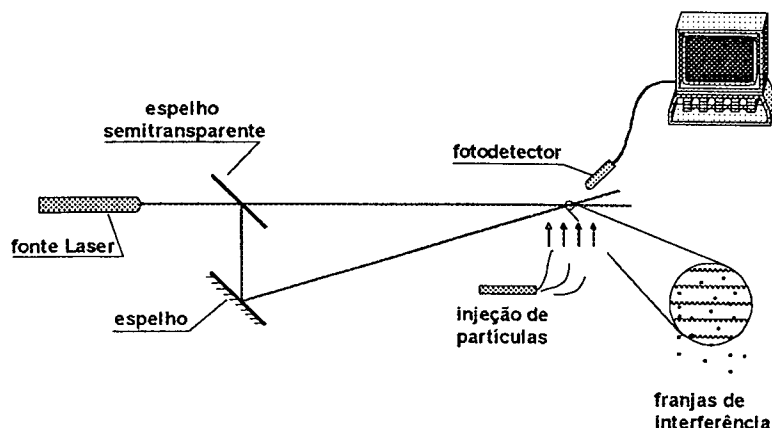


Figura 3: Anemômetro laser a efeito Doppler

1.5 Rotâmetros

Embora os rotâmetros não sejam utilizados para a medição de velocidade e sim de vazão, a explicação desse tipo de instrumento é válida nesse trabalho devido à utilização de rotâmetros durante o processo de calibração do anemômetro a efeito Peltier. O rotâmetro, ou medidor de vazão do tipo área variável, é um dos mais econômicos e utilizados instrumentos de medição de vazão. Possui várias configurações diferentes, que possibilitam a sua utilização em altas pressões, fluidos corrosivos e altas temperaturas. Eles podem ser calibrados para medir praticamente qualquer gás ou líquido, devido aos seus princípios de operação serem simples e bem conhecidos. A indicação da vazão é obtida através do balanço entre as forças de arraste, flutuação e gravitacional.

Isso é feito utilizando-se um tubo cônico, um flutuador cujo diâmetro é próximo ao diâmetro da entrada do tubo e uma escala para correlacionar a altura do flutuador com a vazão. O tubo é colocado tradicionalmente na posição vertical e o fluido entra pela sua extremidade inferior, forçando o flutuador para cima no tubo até que haja uma abertura anular suficiente entre o flutuador e o tubo de forma a equilibrar as forças de arraste, flutuação e gravitacional. Nesse ponto o flutuador está em uma posição de equilíbrio e a sua altura é proporcional à vazão.

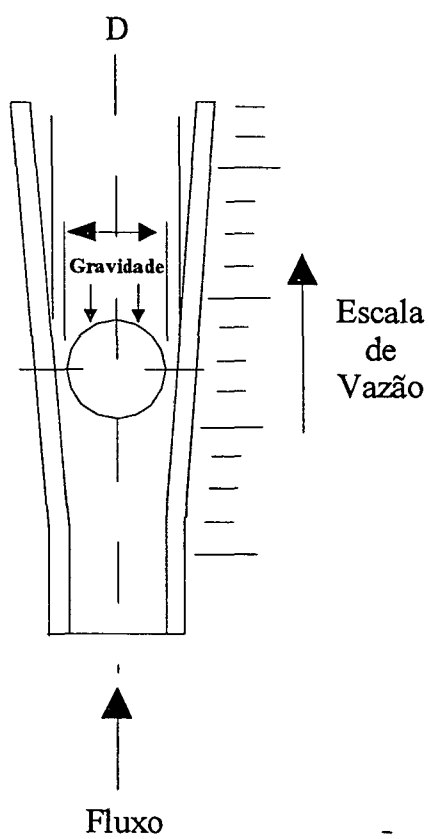


Figura 4: Medidor de vazão do tipo rotâmetro

Capítulo 2: Efeitos térmicos presentes no sensor

Antes da apresentação do equipamento desenvolvido convém efetuar uma breve revisão sobre os efeitos associados ao elemento sensor, dada a seguir.

2.1 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck consiste em uma força eletromotriz gerada na junção de dois materiais, conforme o mostrado na Figura 5. Quando as duas junções encontram-se a temperaturas distintas ocorre uma diferença de potencial dada por:

$$V = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_B - T_C) \quad (1)$$

onde:

V : diferença de potencial [V];

α_1, α_2 : poder termoelétrico dos materiais 1 e 2 [V/K];

T_B, T_C : temperatura das junções [K].

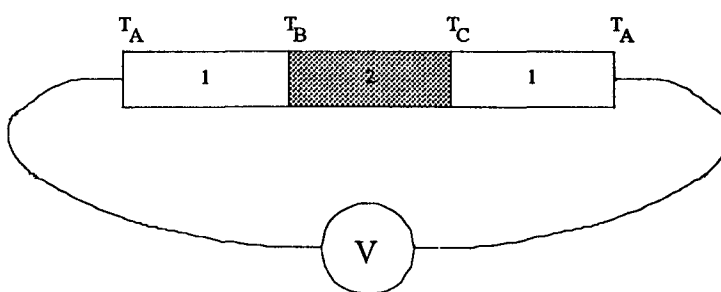


Figura 5: Efeito Seebeck na junção de dois materiais

O poder termoelétrico de um material é variável com a temperatura e essa variação pode ser aproximada por um polinômio. Para um dado termopar é possível aproximar o polinômio resultante $(\alpha_1 - \alpha_2)$ através de uma constante se a variação de temperatura ficar dentro de uma faixa limitada. Por exemplo, em um termopar do tipo cobre - constantan, para uma faixa de temperatura de 0°C a 100°C, o valor da constante é:

$$\alpha_1 - \alpha_2 \simeq 40 \frac{\mu V}{K}$$

2.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier é caracterizado por uma absorção (ou geração) de calor na junção de dois materiais quando atravessados por uma corrente elétrica. O fluxo de calor é absorvido ou gerado, dependendo do sentido da corrente (Figura 6), e dado por:

$$\phi_{Peltier} = (\alpha_1 - \alpha_2) I T \quad (2)$$

onde:

$\phi_{Peltier}$: fluxo de calor gerado ou absorvido por efeito Peltier [W];

I : intensidade da corrente elétrica que atravessa a junção [A];

T : temperatura absoluta da junção [K].

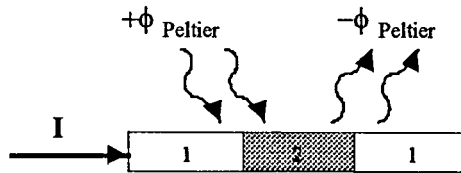


Figura 6: Efeito Peltier na junção de dois materiais

O formalismo da termodinâmica [7] mostra que os efeitos Peltier e Seebeck são reversíveis e energeticamente equivalentes.

2.3 Efeito Thomson

Consiste em um fenômeno de geração ou absorção de energia provocado pela passagem de uma corrente elétrica através de um condutor homogêneo, no qual a temperatura não é uniforme (Figura 7).

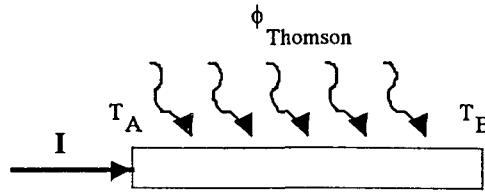


Figura 7: Efeito Thomson em um condutor

O efeito Thomson é distinto do efeito Joule, ao qual se superpõe. De uma maneira simples, a quantidade de calor gerada ou absorvida por efeito Thomson é dada por:

$$\phi_{Thomson} = \Gamma I (T_A - T_B) \quad (3)$$

onde:

$\phi_{Thomson}$: fluxo de calor gerado ou absorvido por efeito Thomson [W];

Γ : coeficiente Thomson [V/K];

I : corrente elétrica [A];

T_A, T_B : temperaturas das extremidades do condutor [K].

A contribuição do efeito Thomson é desprezível em relação ao efeitos Joule e Peltier, como mostrado por Leclercq [8], portanto ele não será considerado neste trabalho.

2.4 Efeitos termoeletricos em circuitos a eletrodos depositados

O sensor utilizado no anemômetro a efeito Peltier consiste em vários termopares associados em série. Para a simplificação do processo de fabricação, o sensor é realizado através da deposição eletrolítica (ou química) de uma capa metálica de grande condutividade elétrica (material 2, Figura 8) sobre um suporte metálico de condutividade inferior e poder termoeletrico diferente (material 1, Figura 8).

As características termoeletricas do sensor são dadas a seguir.

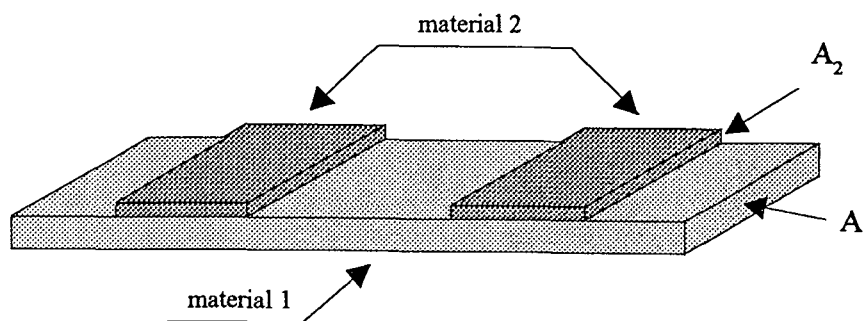


Figura 8: Circuito bimetálico a eletrodos depositados

2.4.1 Poder termoelétrico

O poder termoelétrico de um circuito a eletrodos depositados é dado por [1]:

$$\alpha_{eq} = a_{eq} + b_{eq} T \quad (4)$$

onde:

$$a_{eq} = \frac{a_1 \sigma_1 A_1 + a_2 \sigma_2 A_2}{\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2}, \quad b_{eq} = \frac{b_1 \sigma_1 A_1 + b_2 \sigma_2 A_2}{\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2};$$

T : temperatura [°C];

σ_n : condutividade elétrica [S/m];

A_n : área transversal do material [m²];

a_n, b_n : constantes para obtenção do poder termoelétrico do material.

Essa relação é válida se os seguintes requisitos forem cumpridos:

a) A diferença de temperatura entre as extremidades do circuito não ultrapasse 200K (mais adiante será mostrado que essa diferença é pequena no anemômetro);

b) A condutividade elétrica dos materiais (σ_1 e σ_2) varie de forma desprezível com a temperatura. Para o caso de metais, essa afirmação é válida.

A Tabela 1 fornece os valores de a e b para o cobre e para o constantan. Com esses valores pode-se fazer uma comparação (Figura 10) entre o poder termoelétrico de um termopar do tipo T (cobre-constantan) e o seu equivalente a eletrodos plaqueados.

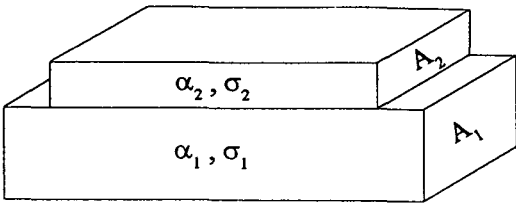


Figura 9: Célula do termopar plaqueado

Tabela 1: Poder termoeletrico

material	$a \left[\frac{\mu V}{K} \right]$	$b 10^{-2} \left[\frac{\mu V}{K^2} \right]$
constantan	-38,1	-8,98
cobre	2,76	1,22

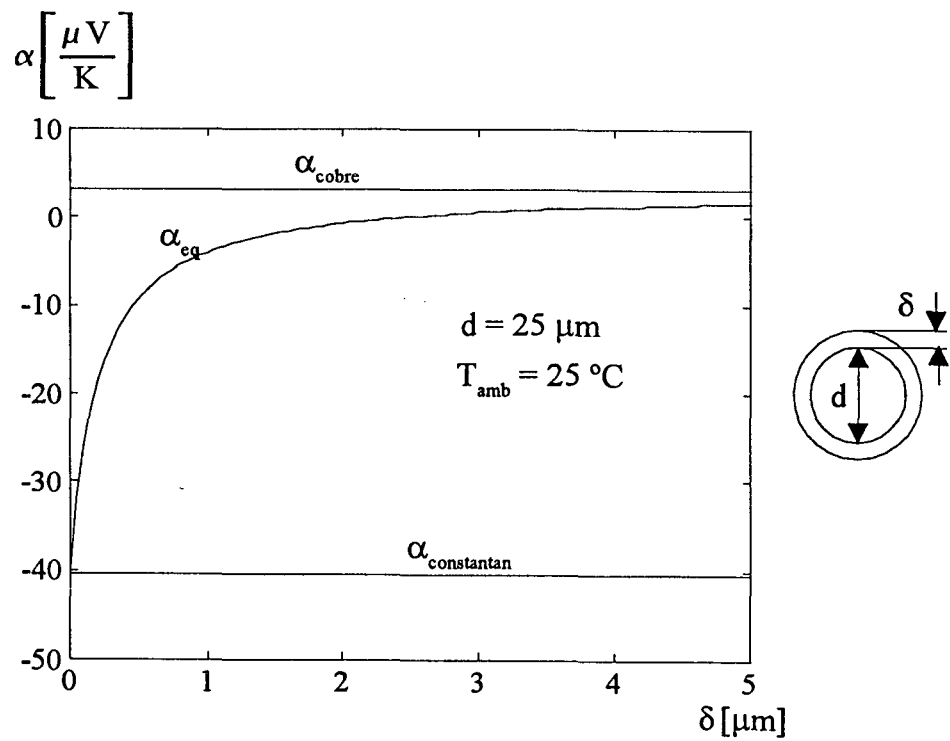


Figura 10: Variação do poder termoeletrico de um termopar plaqueado em função da espessura do depósito (fio de constantan com diâmetro de 25 μm , depósito de cobre)

2.4.2 Efeito Seebeck

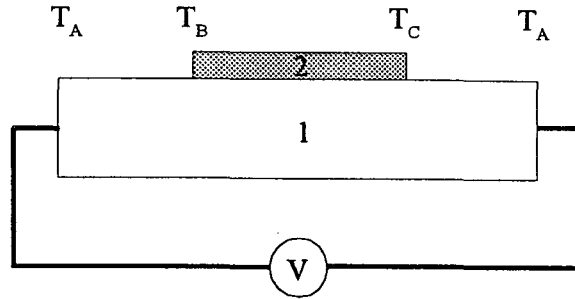


Figura 11: Efeito Seebeck em um termopar plaqueado

O efeito Seebeck presente no termopar plaqueado mostrado na Figura 11 é:

$$V = [\alpha_1(T_A) - \alpha_{eq}(T_A)](T_B - T_C) \quad (5)$$

Cabe ressaltar que a diferença máxima de poder termoelétrico ($\alpha_1 - \alpha_{eq}$) não se dá exatamente na interseção das regiões com e sem plaqueamento. Conforme mostrado por Güths [1], há uma região de transição até que essa diferença seja atingida. No entanto, essa região de transição é pequena (da ordem de dezenas de μm) face aos comprimentos envolvidos no sensor (da ordem de mm). Então, daqui em diante será considerado que esse efeito não altera a sensibilidade dos sensores construídos e, portanto, não será considerado nesse texto.

2.4.3 Efeito Peltier

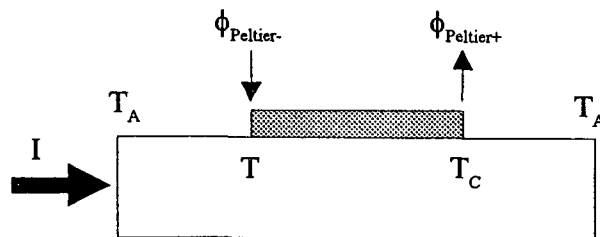


Figura 12: Efeito Peltier em um termopar plaqueado

O efeito Peltier provocado pela passagem de corrente por um termopar plaqueado, conforme mostrado na Figura 12, é dado por:

$$\phi_{Peltier-} = [\alpha_1(T_B) - \alpha_{eq}(T_B)] I T_B ; \quad (6)$$

$$\phi_{Peltier+} = [\alpha_1(T_C) - \alpha_{eq}(T_C)] I T_C . \quad (7)$$

De maneira análoga ao exposto no item anterior, o efeito da transição da diferença de poder termoelétrico dos materiais não será considerado por não produzir alterações nos valores de $\phi_{Peltier+}$ e $\phi_{Peltier-}$.

2.5 Fenômenos de transferência de calor no sensor

Como o anemômetro a efeito Peltier baseia-se no aquecimento e no resfriamento de pontos do elemento sensor, é natural que haja transferência de calor entre esses pontos e entre os pontos e o ar. Os três fenômenos de transferência de calor são a radiação, a condução e a convecção. Uma breve descrição de cada um desses fenômenos será dada para uma melhor compreensão do dispositivo.

2.5.1 Radiação

Qualquer meio material a uma temperatura superior ao zero absoluto irradia energia [9]. Independentemente do estado da matéria (sólido, líquido ou gasoso), a emissão pode ser atribuída às modificações das configurações eletrônicas dos átomos ou das moléculas que a constituem. A transferência de calor por radiação se dá por ondas eletromagnéticas e não exige a presença de um meio material, sendo que sua maior eficiência se dá no vácuo. O fluxo de calor máximo (q'') que pode ser emitido por uma superfície é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$q'' = \sigma T_s^4 \quad (8)$$

onde:

$$q'' : \text{fluxo de calor} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] ;$$

T_s : temperatura da superfície [K];

σ : constante de Stefan-Boltzmann $\left(\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right)$.

Essa superfície é denominada um **radiador ideal** ou um **corpo negro**. O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor que o emitido por um radiador ideal e dado por:

$$q'' = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (9)$$

onde:

ε : emissividade da superfície $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$.

O valor de ε depende da superfície e indica a sua eficiência de transmissão, em comparação com um radiador ideal. Inversamente, se houver a incidência de radiação sobre uma superfície, uma parcela será absorvida e a taxa que mede essa absorção por unidade de área superficial é dada por:

$$q''_{\text{absorvido}} = \alpha q''_{\text{incidente}} \quad (10)$$

onde:

α : absortividade da superfície $(0 \leq \alpha \leq 1)$.

O valor de α também depende da superfície e, em meios sólidos e para materiais utilizados em engenharia, é usual fazer a aproximação $\alpha = \varepsilon$.

Para o caso do anemômetro, a troca de calor por radiação é baixa em relação às outras formas de troca de calor. Isso deve-se ao baixo aquecimento do sensor e à baixa emissividade de superfícies brilhantes. Então, esse modo de transferência não será considerado no decorrer desse texto.

2.5.2 Condução

A presença de um gradiente de temperatura em uma substância causa uma transferência de energia através do mecanismo de *condução* [9]. Ela se dá em nível molecular, com a transferência de energia das partículas com maior energia cinética para as com menor energia cinética, devido às interações entre as partículas.

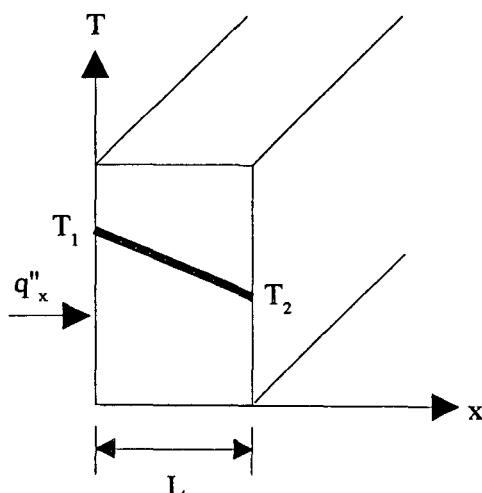


Figura 13: Exemplo unidimensional de condução de calor

A relação básica para se calcular a condução em uma substância é a lei de Fourier. Ela estabelece, em regime permanente, que o fluxo de calor (q'') é proporcional ao valor da componente do gradiente de temperatura na direção daquele fluxo. Para um caso unidimensional como o mostrado na Figura 13, a qual mostra a aplicação de fluxo de calor em uma parede de um bloco, q'' é dado por:

$$q''_x = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (11)$$

onde:

q''_x : fluxo de calor avaliado em x $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$;

λ : condutividade térmica do material $\left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$;

T_1 : temperatura na face 1 [K];

T_2 : temperatura na face 2 [K].

2.5.3 Convecção

É a transferência de energia entre um fluido e uma superfície sólida, na qual dois fenômenos estão envolvidos. Um é a transferência de energia por condução através das partículas do fluido

devido à presença de um gradiente de temperatura no mesmo. Outro é a transferência de energia dentro do fluido quando ele se movimenta de uma posição para outra [9].

A transferência convectiva de calor pode ser classificada de acordo com a origem da movimentação (escoamento) do fluido. *Convecção forçada* é o escoamento provocado, por exemplo, por um ventilador ou por ventos na atmosfera. *Convecção livre* ou *natural* é o escoamento provocado pelas forças de empuxo que se originam das diferenças de densidade provocadas pelas variações de temperatura no fluido.

Para o caso do anemômetro a efeito Peltier há especial interesse na convecção livre já que, nesse tipo de escoamento, as velocidades envolvidas são baixas. Como exemplo de aplicação pode-se citar a medição do movimento de ar causado por uma placa plana vertical aquecida.

A transferência de calor por convecção é então a combinação de condução e do movimento macroscópico do fluido e é dada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

onde:

$$q'' : \text{fluxo de calor} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] ;$$

T_s : temperatura na superfície do sólido [K];

T_∞ : temperatura do fluido, longe da superfície do sensor [K];

$$h : \text{coeficiente de transferência de calor por convecção} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] .$$

O parâmetro h inclui todos os parâmetros que influenciam a transferência de calor por convecção. Depende da geometria da superfície, da natureza do movimento do fluido e de um conjunto de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Nesse texto, quando necessário, serão apresentados métodos para o cálculo de h .

Há especial interesse nesse fenômeno de transferência de calor para o caso do anemômetro a efeito Peltier, pois é ele que estabelece a relação entre a velocidade do ar e a temperatura do sensor, para q'' e T_∞ constantes.

Capítulo 3: O anemômetro a efeito Peltier

3.1 Princípio de funcionamento

Para a explicação do princípio de funcionamento será considerado, por simplicidade, um sensor composto por uma única célula. O anemômetro a efeito Peltier opera de forma alternada entre os efeitos Peltier e Seebeck. Em um primeiro momento aplica-se uma corrente elétrica no sensor que provoca o aquecimento de uma das junções e o resfriamento da outra (Figura 14).

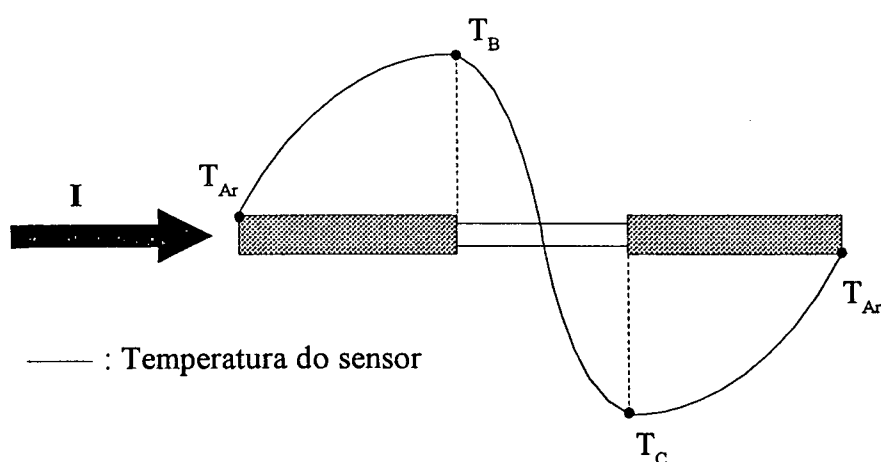


Figura 14: Efeito Peltier em uma célula do sensor

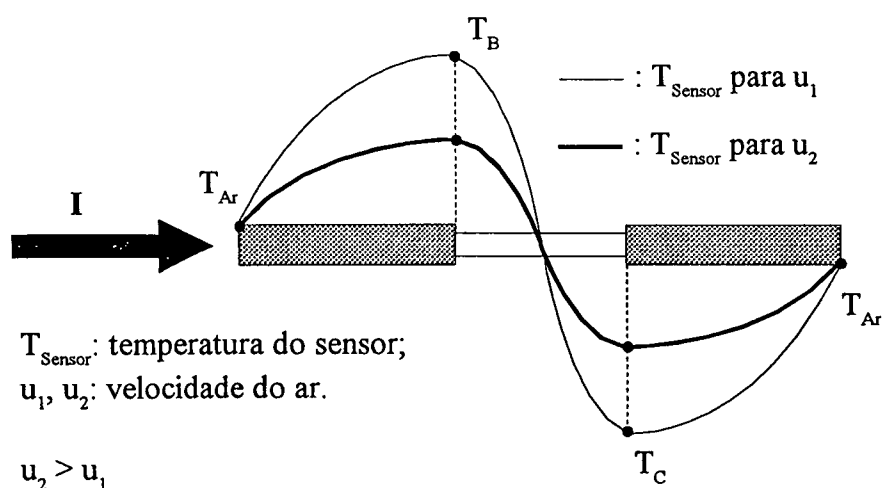


Figura 15: Alteração na temperatura do sensor devido a velocidade do ar

Essa diferença de temperatura entre as junções é dependente da velocidade do ar. Conforme a velocidade do ar aumenta, há um decréscimo na diferença de temperatura entre as junções, como mostra a Figura 15.

Para a medição da diferença de temperatura entre as junções utiliza-se o efeito Seebeck. Como a magnitude da tensão gerada pelo efeito Seebeck é pequena (da ordem de centenas de μV) em relação à tensão provocada pela passagem da corrente através da resistência do sensor (da ordem de centenas de mV), torna-se necessário interromper a corrente para a medição da diferença de temperatura. Então, a corrente injetada no sensor é pulsada, conforme mostra a Figura 16.

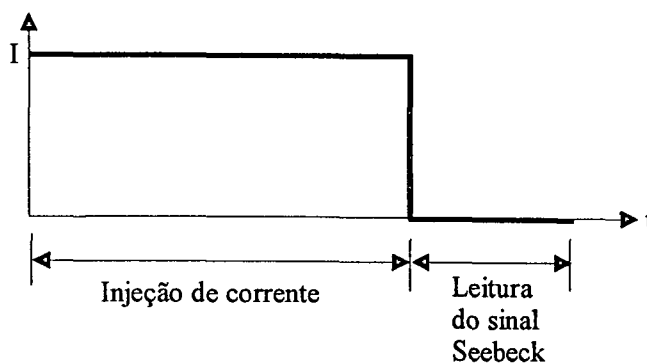


Figura 16: Períodos de injeção de corrente e leitura do sinal Seebeck

3.2 Compensação do efeito de gradiente de temperatura

Para que a medição de velocidade seja executada corretamente através do método exposto, a temperatura do ar deve ser homogênea. Em casos onde isso não ocorre, como o mostrado na Figura 17, há a geração de uma componente parasita independente da velocidade do ar $(l_{npl}(dT/dx))$. Portanto, a diferença de temperatura entre as junções é dada por:

$$\Delta T = \Delta T_+ = \Delta T_{Peltier} + l_{npl} \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (13)$$

onde:

l_{npl} : comprimento da região sem plaqueamento [m].

Essa componente parasita superpõe-se ao sinal de interesse $\Delta T_{Peltier}$, fazendo com que gradientes de temperatura sejam confundidos com a informação de velocidade.

Além da análise feita através da Figura 17, há também o caso mostrado na Figura 18, onde as condições ambientes foram mantidas e o sentido da corrente injetada foi alterado. Para esse caso, a diferença de temperatura entre as junções é dada por:

$$\Delta T = \Delta T_- = -\Delta T_{Peltier} + l_{npl} \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (14)$$

Então, se ao invés de a injeção de corrente ser efetuada em apenas um sentido, sendo feita nos dois, e os resultados obtidos nos respectivos intervalos de medição do sinal Seebeck forem subtraídos:

$$Sinal = \Delta T_+ - \Delta T_- = 2 \Delta T_{Peltier} \quad (15)$$

Obviamente, a temperatura do ar é suposta constante entre os intervalos de medição da tensão Seebeck dos ciclos positivo e negativo.

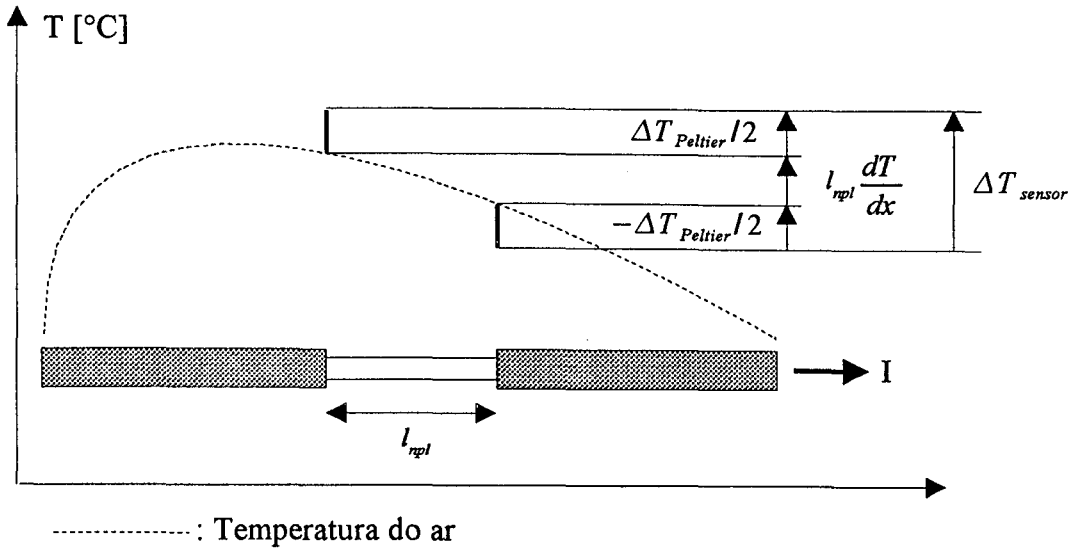


Figura 17: Efeito de um gradiente de temperatura na medição do sinal Seebeck

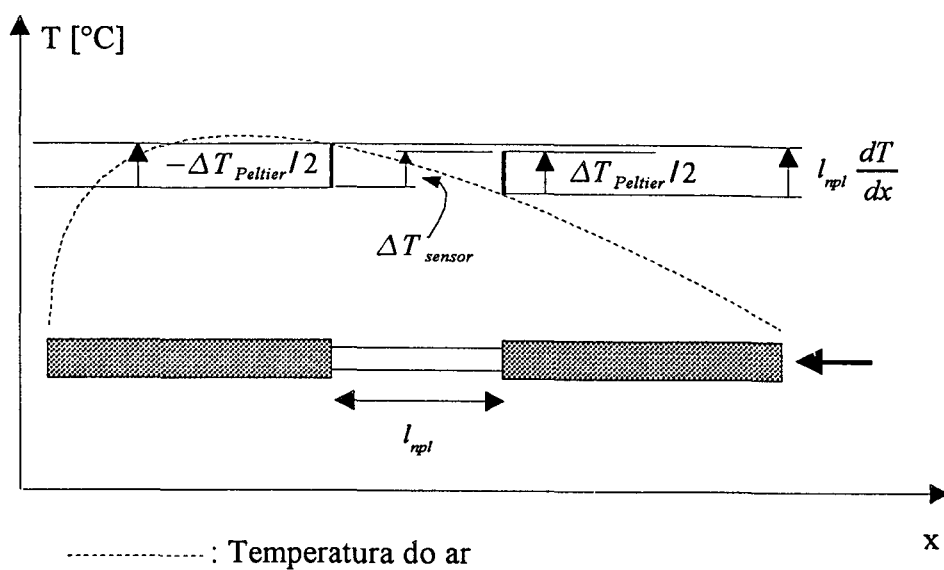


Figura 18: Inversão do sentido da corrente injetada

Essa é a solução adotada nesse trabalho (Figura 19) e os circuitos associados e os resultados obtidos são dados a seguir.

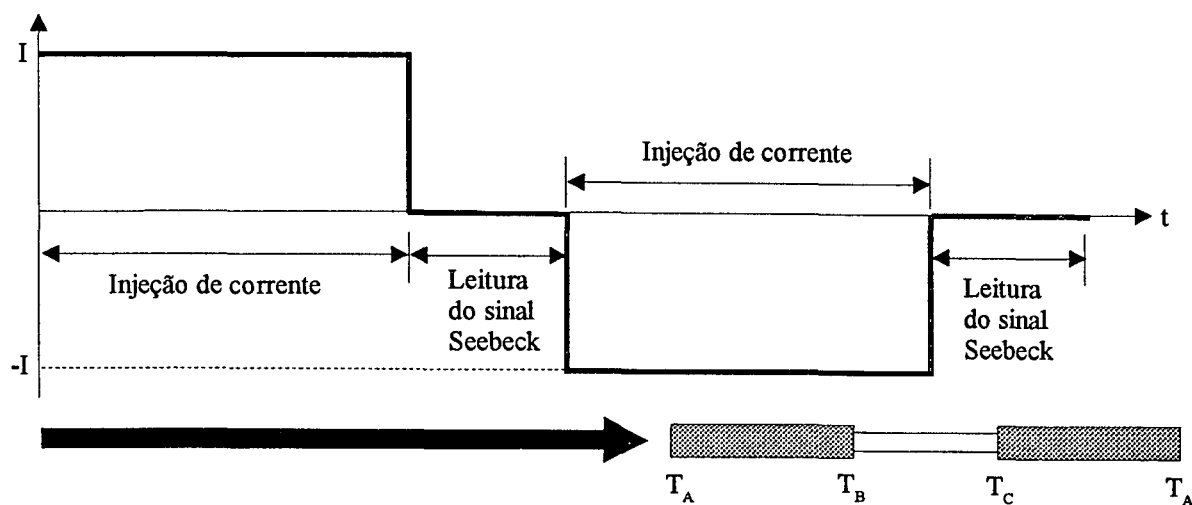


Figura 19: Ciclo completo de injeção de corrente e medição do efeito Seebeck

3.3 Fonte de corrente

A fonte de corrente necessária ao anemômetro deve possuir duas características básicas:

1. Fornecimento de corrente positiva e negativa;
2. Corte da corrente.

O circuito utilizado no protótipo deriva do circuito básico mostrado na Figura 20.

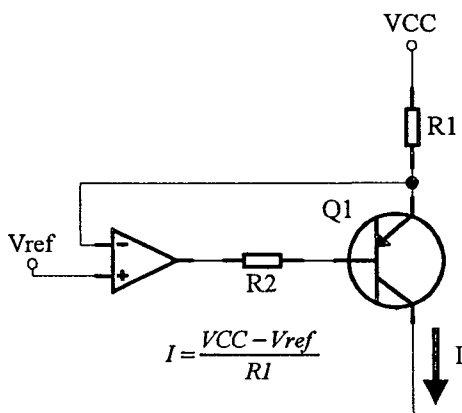


Figura 20: Fonte de corrente positiva

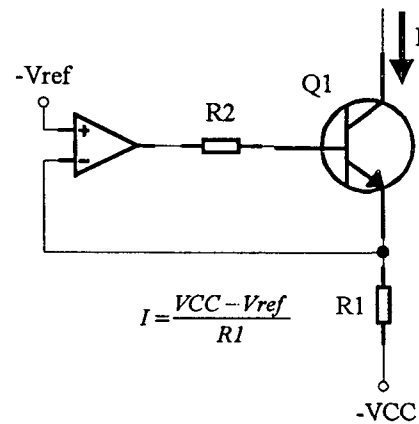


Figura 21: Fonte de corrente negativa

Como há a necessidade da corrente de saída tornar-se negativa, o circuito complementar mostrado na Figura 21 pode ser utilizado.

O corte da corrente pode ser efetuado chaveando-se a base dos transistores para potenciais que os levem ao corte. No entanto deve-se evitar que os amplificadores operacionais sejam levados à saturação para prevenir problemas tais como o *slew-rate*. Uma solução é chavear a entrada inversora de cada amplificador, de forma a ligá-las às suas respectivas saídas quando os transistores estiverem cortados. Esse estado corresponde à configuração seguidor de tensão para o amplificador operacional.

As idéias apresentadas estão sintetizadas na Figura 22, a qual mostra a fonte de corrente utilizada no anemômetro. Observa-se a presença de um amplificador inversor de ganho unitário, o qual fornece a tensão $-V_{ref}$ para a etapa que produz a corrente negativa. Os sinais de controle são gerados através do circuito apresentado na Figura 29. Outra característica da fonte de corrente produzida é a variação da amplitude de I , através da alteração de V_{ref} .

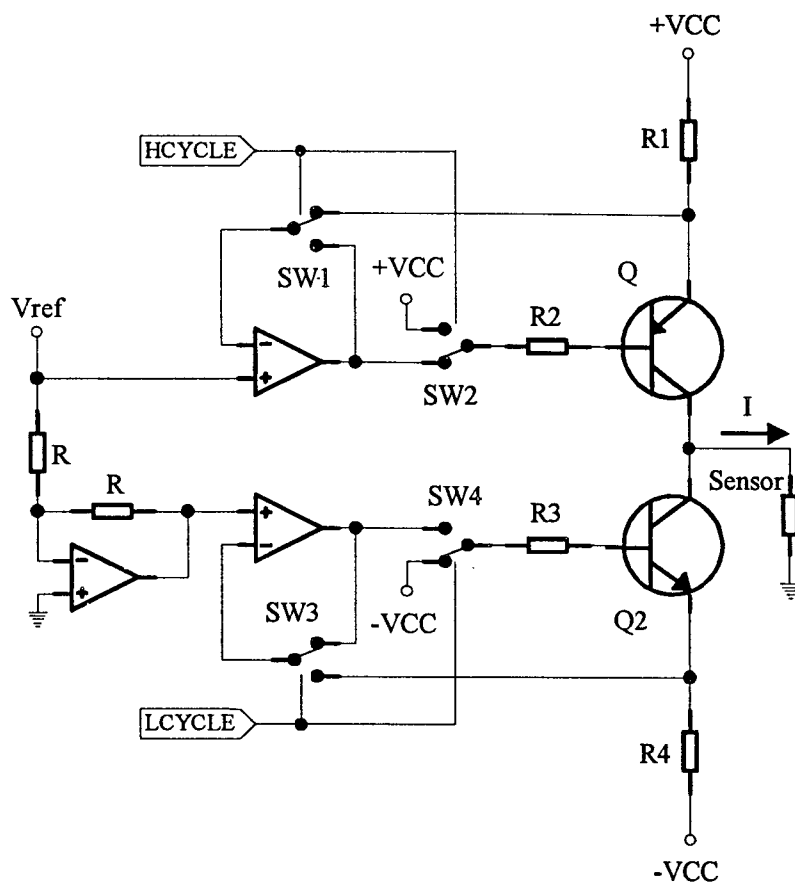


Figura 22: Fonte de corrente utilizada no anemômetro

3.4 Detecção do sinal Seebeck

Para que o sinal Seebeck possa ser convenientemente processado há a necessidade de amplificá-lo, devido à sua baixa magnitude (centenas de μV). Essa amplificação é feita pelo circuito dado na Figura 23. Trata-se de um amplificador de ganho 1000 composto por três estágios de ganho 10. Essa topologia foi adotada para evitar a diminuição da resposta em frequência dos amplificadores operacionais que ocorreria caso uma etapa de ganho elevado fosse utilizada. As chaves CMOS presentes nessa etapa fazem o isolamento entre as etapas de amplificação durante os intervalos de injeção de corrente, de forma que os operacionais não sejam levados à saturação e evitando que *glitches* se propaguem.

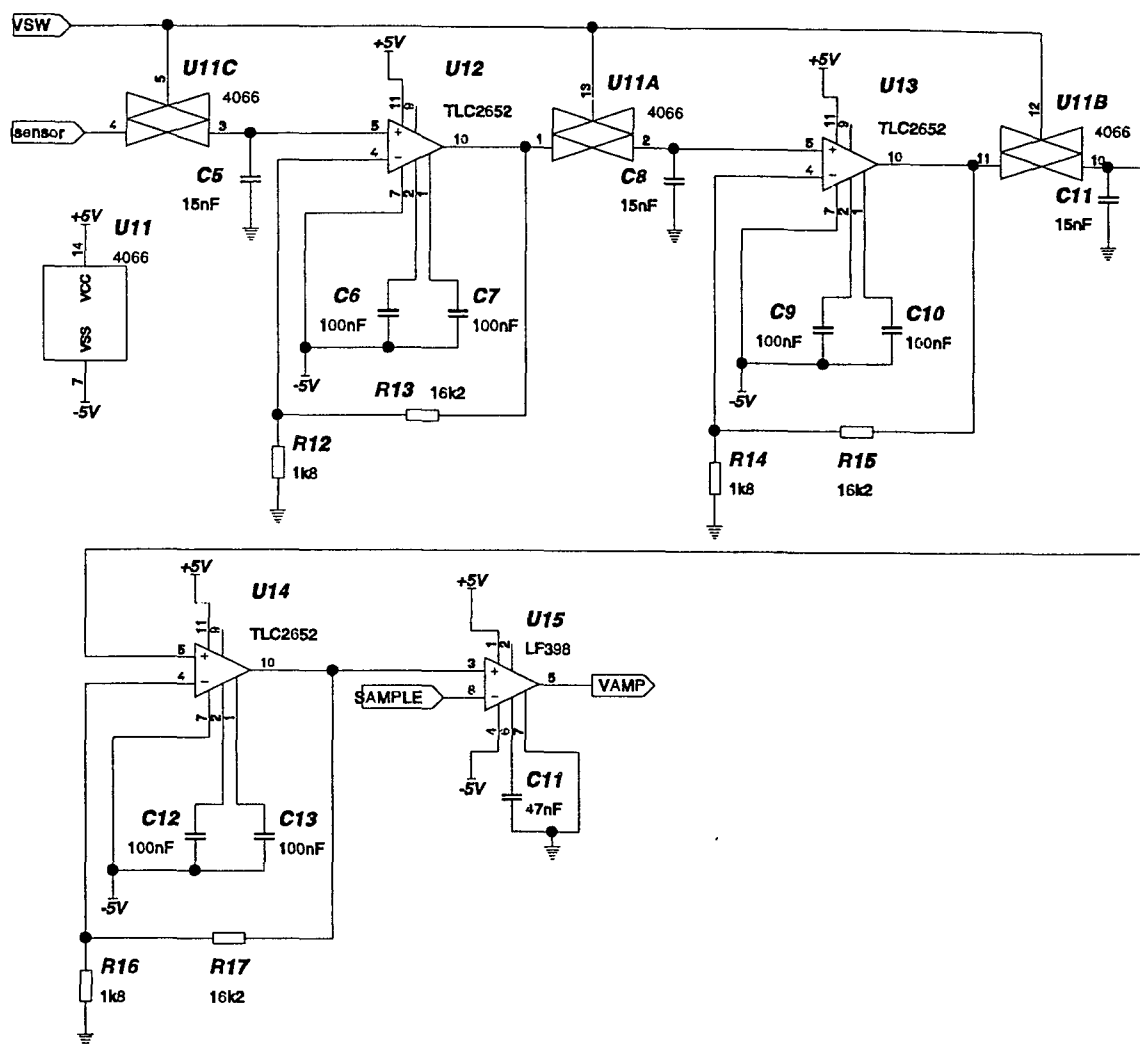


Figura 23: Circuito de amplificação da tensão obtida por efeito Seebeck

A etapa de detecção utiliza operacionais de baixo *offset* (tipicamente $1\mu\text{V}$), para que o erro gerado por essa não idealidade seja o mínimo possível sem a necessidade de circuitos adicionais de compensação. Conforme a Figura 23 mostra, a saída do amplificador é conectada a uma etapa de amostragem, a qual executa a reconstrução do sinal Seebeck amplificado. Um sinal de saída típico é mostrado na Figura 24.

O tempo t_a mostrado na Figura 24 origina-se basicamente por efeitos térmicos, pois os atrasos gerados pelos dispositivos eletrônicos são consideravelmente menores do que a constante de tempo envolvida no sensor. A presença dessa constante explica-se pelo fato de que as temperaturas das junções presentes no sensor não são alteradas instantaneamente quando a corrente é invertida. Esse atraso é função dos parâmetros físicos do sensor e do ar, tais como o seu comprimento, diâmetro, espessura do depósito, condutividade térmica dos materiais constituintes do sensor,

velocidade do ar e calor específico dos materiais. O seu cálculo é um tanto complexo e fora do escopo desse trabalho. No entanto a sua determinação se faz necessária para a aquisição do sinal Seebeck, a qual deve ser efetuada somente quando o sinal estiver estabilizado. Para tanto utilizou-se um método empírico, através do qual verificou-se, para uma dada corrente I , quantos pulsos de injeção são necessários para a estabilização de V_{AMP} (Figura 23). Após a determinação desse valor mínimo estipulou-se um número maior de pulsos para que não houvesse a necessidade de novas determinações quando da troca de sensores.

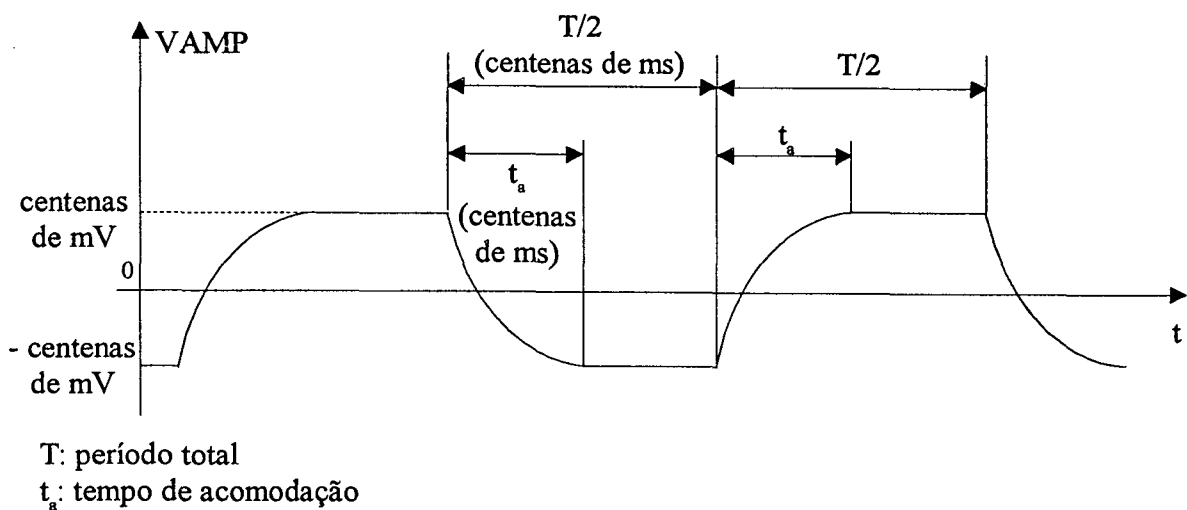


Figura 24: Sinal típico na saída do amplificador

Para facilitar a implementação do instrumento e a sua calibração, optou-se pela utilização de um microcontrolador, o qual, além de fornecer os sinais de controle, também adquire o sinal fornecido pelo sensor de velocidade e o de temperatura. O conversor A/D do microcontrolador utilizado é capaz de processar somente tensões positivas. Como o sinal proveniente da etapa de amplificação possui níveis positivos e negativos a utilização de um circuito de retificação tornou-se necessária.

O circuito retificador [10] está mostrado na Figura 25. A característica principal que levou à escolha desse circuito é que apenas dois resistores precisam ser casados (R_{18} e R_{19}), o que o torna consideravelmente preciso para montagem com componentes discretos. Nesse retificador os amplificadores operacionais não são levados à saturação, o que é desejável pois significa menores distorções do sinal de saída devido ao slew-rate dos operacionais.

Antes da etapa de conversão A/D é conveniente que o sinal a ser convertido passe por uma etapa de filtragem. Isso é necessário para a eliminação de frequências não desejadas, tais como a

induzida pela rede elétrica (60Hz). Um dos fatores de projeto é a simplicidade e um circuito simples de filtragem é o integrador com perdas [11]. Como esse integrador também executa a inversão de polaridade do sinal de entrada, foi necessário adicionar uma etapa inversora [11], de forma que o sinal resultante fosse positivo. A Figura 26 mostra o filtro utilizado.

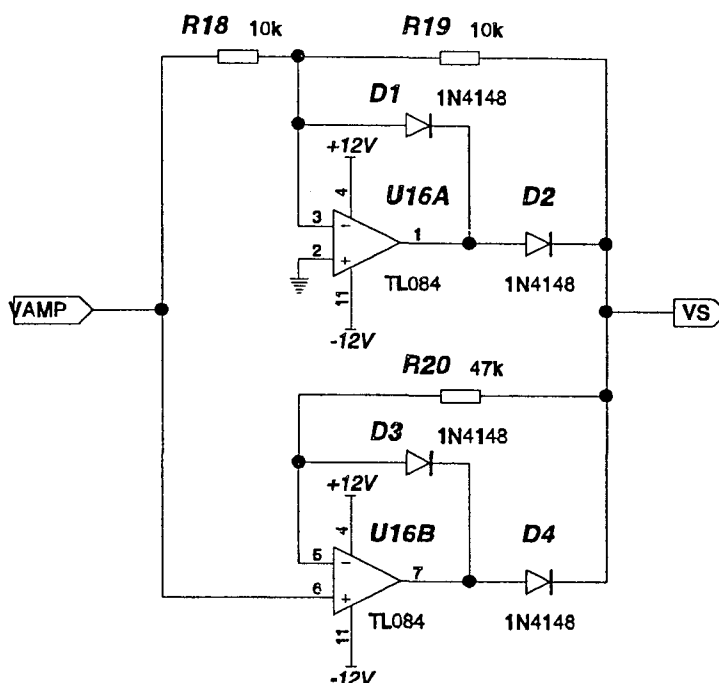


Figura 25: Retificador de precisão

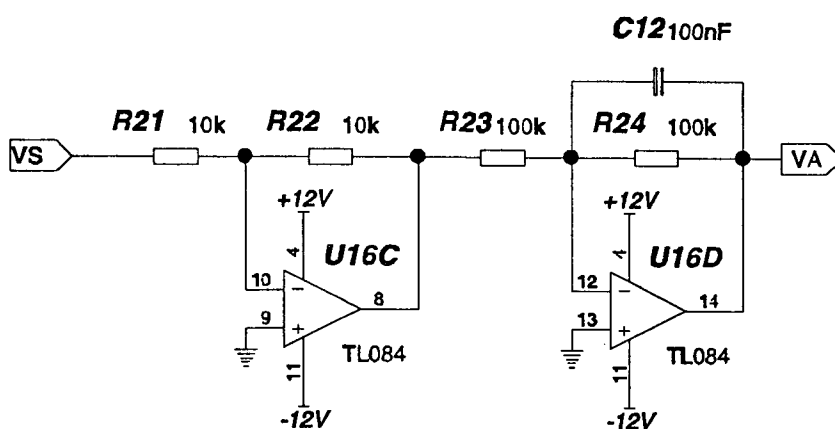


Figura 26: Filtro com $f_{coria} = 15$ Hz

3.5 Compensação de temperatura

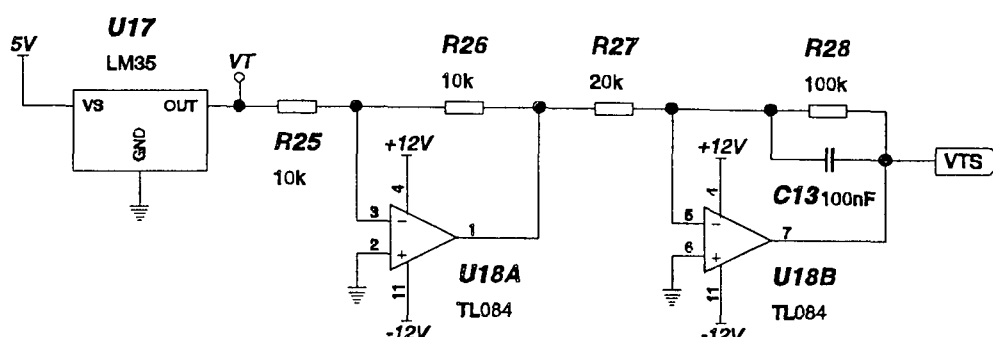


Figura 27: Compensação de temperatura

O sinal proveniente do sensor varia com a temperatura do ar, conforme será exibido no Capítulo 4. Então, uma forma de compensação torna-se necessária. Optou-se por fazer a compensação via software através do microcontrolador, pela maior simplicidade de implementação e calibração. A forma de medição da temperatura do ar é dada na Figura 27. Nela observa-se que o elemento sensor é constituído por um circuito integrado LM35, cuja tensão de saída é dada por:

$$V_T = 0.01 T_{amb} \quad [\text{V}]$$

Para um melhor aproveitamento da faixa de leitura do conversor A/D, a tensão proveniente do LM35 é amplificada por um amplificador de ganho 5 e frequência de corte 15 Hz. O amplificador possui banda limitada para evitar a presença de ruído na medição. Da mesma forma que no caso anterior, a tensão fornecida para o conversor A/D deve ser positiva, o que explica a presença do inversor no circuito.

3.6 Controle das chaves e aquisição dos sinais

Conforme colocado anteriormente, os sinais de controle e aquisição são supridos por um microcontrolador. Isso proporciona maior flexibilização das temporizações dos sinais de controle necessários às chaves do anemômetro e facilita as calibrações do instrumento. O microcontrolador utilizado possui as seguintes características [12]:

- Modelo: ATMEGA 103L;

- Fabricante: ATMEL;
- Tensão de alimentação : 2.7 - 3.6V;
- Consumo: 3mA (típico);
- Frequência de operação : 0 - 4MHz;
- Memória de programa (FLASH) de 128 kbytes;
- Memória de dados de 4 kbytes;
- Memória EEPROM de 4 kbytes;
- 32 linhas de E/S programáveis, 8 linhas de entrada e 8 linhas de saída;
- Dois temporizadores/contadores de 8 bits;
- Um temporizador/contador de 16 bits;
- Um conversor A/D de 10 bits com 8 canais;
- UART serial programável;
- Programação via ISP, dispensando o uso de EPROM.

Essas características foram determinantes para a escolha desse microcontrolador, já que ao englobar os temporizadores/contadores, conversor A/D, UART, memória de programa extensa e programação via ISP, o hardware necessário para montagem do anemômetro foi bastante reduzido. Particularmente a programação via ISP é um recurso interessante, pois possibilita a programação do microcontrolador montado no circuito final, reduzindo custos e poupando tempo durante a fase de testes do protótipo.

A utilização do microcontrolador se deu através da placa de experimentação fornecida pelo fabricante (Figura 28).

Através dessa placa, além do controle das chaves e da aquisição dos sinais, também é efetuada a comunicação entre o protótipo e um micro do tipo PC via uma conexão serial, conforme mostra a Figura 29. Através dessa interface são enviados os dados de velocidade e temperatura adquiridos, para posterior tratamento ou armazenamento.

As chaves utilizadas na etapa de amplificação (Figura 23) necessitam de um sinal de controle que tenha níveis positivo e negativo. Então o circuito mostrado na Figura 30, que é um deslocador de nível inversor, se faz necessário.

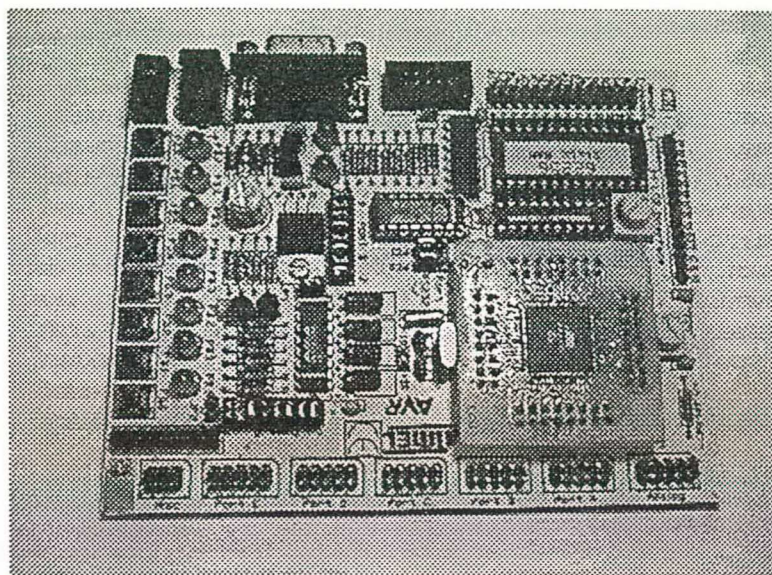


Figura 28: Placa de experimentação STK300

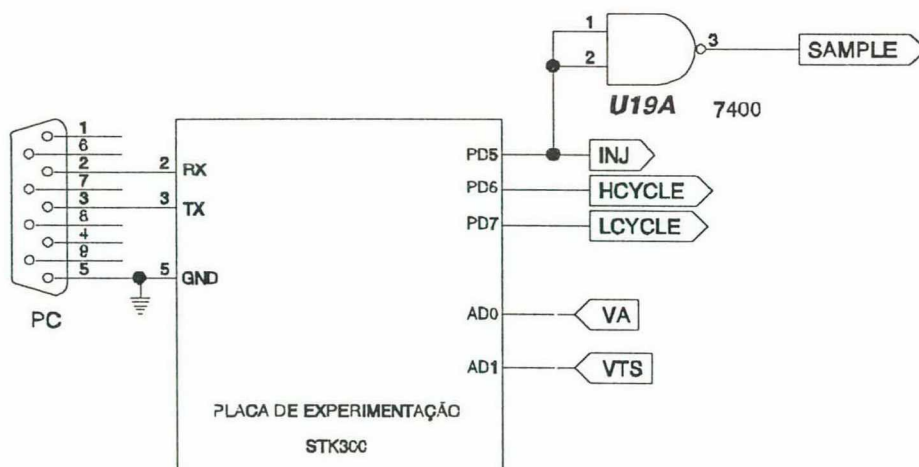


Figura 29: Controle das chaves, aquisição dos sinais e comunicação serial

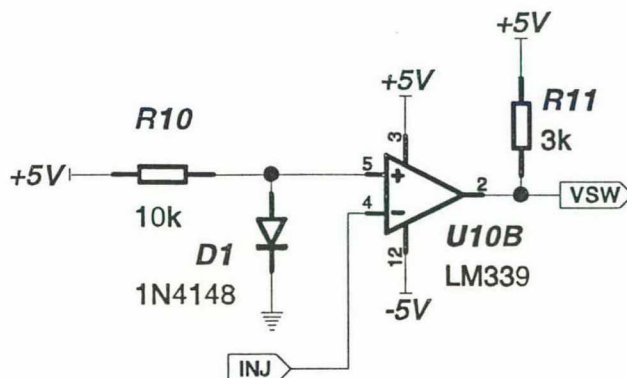


Figura 30: Deslocador de nível

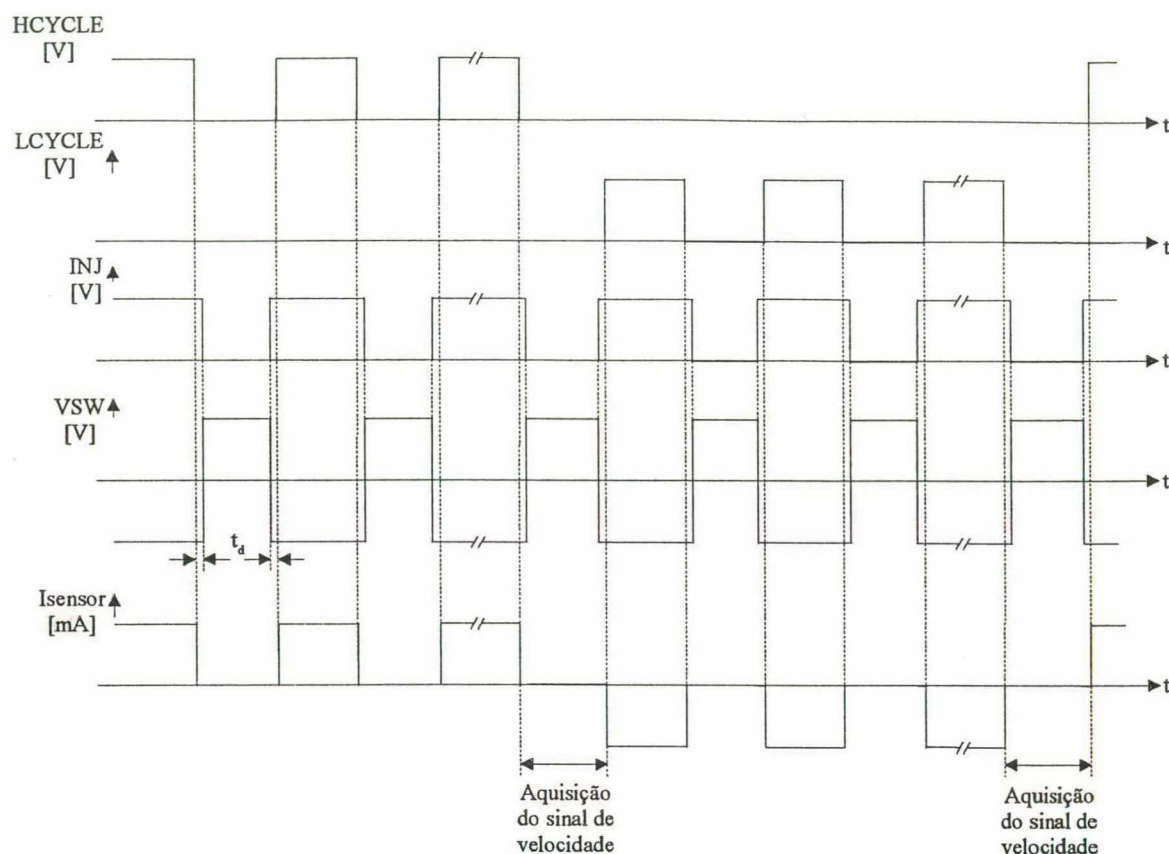


Figura 31: Temporizações supridas pelo microcontrolador

Os sinais de controle necessários para as chaves presentes no anemômetro são dados na Figura 31. Nela percebe-se a existência de atrasos (t_d) entre os comandos de direção da corrente (HCYCLE e LCYCLE) e o controle de aquisição do sinal de velocidade (INJ). Esses atrasos são necessários para evitar a formação de glitches na etapa de amplificação. O valor de t_d depende da velocidade de comutação das chaves e, para o protótipo montado, o seu valor é de aproximadamente $14 \mu\text{s}$.

Conforme comentado anteriormente, há vários pulsos de injeção de corrente antes que a leitura do sinal de velocidade seja efetuada, para que as temperaturas nas junções do sensor possam se estabilizar. Isso também está representado na Figura 31, a qual mostra que a leitura é efetuada somente após o último pulso de corrente de cada ciclo.

Capítulo 4: Otimização dos parâmetros dimensionais do sensor

A otimização das dimensões do sensor usado no anemômetro a efeito Peltier é necessária para a obtenção de melhores características de sensibilidade, menor perturbação por efeito Joule, etc. Para esse fim, os métodos mostrados a seguir foram utilizados, de forma a estabelecer as melhores relações de compromisso para a faixa de medição desejada e atendendo às limitações tecnológicas de construção do sensor.

4.1 Estudo analítico do anemômetro a efeito Peltier

O estudo dos fenômenos termoelétricos associados ao anemômetro está apresentado nesse item de forma simplificada. As simplificações feitas justificam-se devido às imprecisões nos modelos do coeficiente de troca de calor por convecção, h , em função da velocidade, os quais são basicamente empíricos. Além disso, uma análise muito detalhada levaria a modelos solúveis somente de forma numérica, tais como elementos finitos, o que foge do escopo desse trabalho. A análise será feita baseando-se no sensor mostrado na Figura 32.

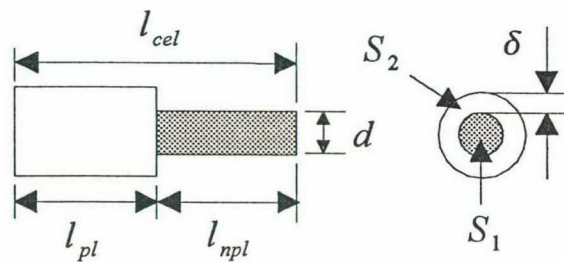


Figura 32: Parâmetros dimensionais do sensor

onde:

- l_{cel} : comprimento total da célula [m];
- l_{pl} : comprimento da região plaqueada [m];
- l_{npl} : comprimento da região não plaqueada [m];
- S_1 : seção transversal da região não plaqueada [m²];
- S_2 : seção transversal da região plaqueada [m²];
- d : diâmetro do fio de suporte [m];
- δ : espessura do depósito [m].

Como o diâmetro do fio é pequeno, para os sensores de interesse, e os materiais utilizados na construção do sensor possuem condutividades térmicas elevadas, a temperatura de uma dada seção transversal pode ser considerada constante. Assim, o campo de temperaturas no fio pode ser reduzido a uma forma unidimensional, o que significa que a variação de temperatura é admitida apenas ao longo de seu comprimento.

Com as aproximações apresentadas, torna-se possível determinar mais facilmente a troca de calor do sensor com o ar. Essa troca de calor possui duas componentes; uma gerada pelo efeito Peltier e outra por efeito Joule. Convenientemente, esses dois fenômenos são independentes, significando que são desacoplados energeticamente [13]. Então, a troca de calor causada por efeito Peltier pode ser determinada independentemente da dissipação causada por efeito Joule.

A dissipação de energia gerada por efeito Peltier em cada junção pode ser decomposta em dois fluxos, conforme mostra a Figura 33.

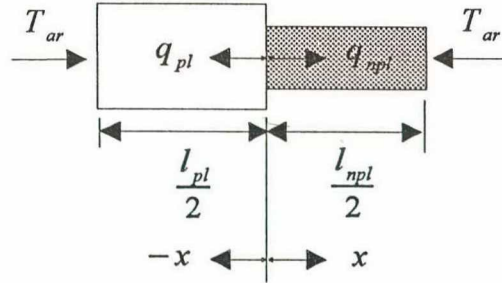


Figura 33: Fluxo de calor na junção

onde:

$$q_{Peltier} = q_{pl} + q_{npl} \quad (16);$$

$q_{Peltier}$: dissipação gerada por efeito Peltier [W];

q_{npl} : fluxo de calor para a região sem depósito [W];

q_{pl} : fluxo de calor para a região com depósito [W];

T_{ar} : temperatura do ar [K].

Como a temperatura de uma dada seção transversal é admitida constante, o gradiente de temperatura ao longo do termopar a eletrodos depositados é dado por:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - m^2 \vartheta = 0 \quad (17)$$

sendo

$$\vartheta = T(x) - T_{ar} \quad (18)$$

Para um corpo cilíndrico:

$$m = \sqrt{\frac{4h}{\lambda d}} \quad [\text{m}^{-1}]$$

onde:

h : coeficiente de troca de calor por convecção $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$;

λ : condutividade térmica $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$;

d : diâmetro do cilindro [m].

Considerando-se que as condições de contorno para a Eq.17 sejam as temperaturas nas extremidades do cilindro:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_{juncao} \quad , \quad \vartheta(x=l_{pl}/2) = 0 \quad , \quad \vartheta(x=l_{npl}/2) = 0 \quad .$$

A solução da Eq.17, do tipo hiperbólico, é dada por:

$$\vartheta_{pl}(x) = \vartheta_{juncao} \frac{\sinh \left[m_{pl} \left(\frac{l_{pl}}{2} - x \right) \right]}{\sinh \left(m_{pl} \frac{l_{pl}}{2} \right)} \quad [\text{K}] \quad (19)$$

$$\vartheta_{npl}(x) = \vartheta_{juncao} \frac{\sinh \left[m_{npl} \left(\frac{l_{npl}}{2} - x \right) \right]}{\sinh \left(m_{npl} \frac{l_{npl}}{2} \right)} \quad [\text{K}]; \quad (20)$$

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{4h}{\lambda_{eq}(d+2\delta)}} \quad , \quad m_{npl} = \sqrt{\frac{4h}{\lambda_{npl}d}} \quad . \quad (21)$$

onde:

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_{npl}S_{npl} + \lambda_{pl}S_{pl}}{S_{npl} + S_{pl}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] ;$$

$$\lambda_{npl} : \text{condutividade térmica da região não plaqueada} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] ;$$

$$\lambda_{pl} : \text{condutividade térmica do material de plaqueamento} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] .$$

Os fluxos de calor para os lados plaqueado e não plaqueado são dados por [14]:

$$q_{pl} = \frac{M_{pl}}{\tanh \left(\frac{m_{pl}l_{pl}}{2} \right)} \quad ; \quad M_{pl} = \vartheta_{juncao} \sqrt{(h\lambda_{eq}S_{pl}P_{pl})} \quad (22)$$

e

$$q_{npl} = \frac{M_{npl}}{\tanh \left(\frac{m_{npl}l_{npl}}{2} \right)} \quad ; \quad M_{npl} = \vartheta_{juncao} \sqrt{(h\lambda_{npl}S_{npl}P_{npl})} \quad . \quad (23)$$

onde:

S_{pl} : área da seção transversal da região plaqueada [m^2];

S_{npl} : área da seção transversal da região não plaqueada [m^2];

P_{pl} : perímetro da região plaqueada, avaliado à seção transversal [m];

P_{npl} : perímetro da região não plaqueada, avaliado à seção transversal [m].

A Tabela 2 fornece os valores de condutividade térmica para os materiais usados na construção do sensor.

Tabela 2: Condutividade térmica dos materiais usados no anemômetro

<i>Material</i>	<i>Símbolo</i>	Condutividade térmica $\left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$
Cobre	λ_{pl}	401
Constantan	λ_{npl}	19.5

Com a substituição da Eq.22 e da Eq.23 na Eq.16, chega-se a :

$$\vartheta_{juncao} = \frac{q_{Peltier}}{\frac{\sqrt{(h\lambda_{eq}S_{pl}P_{pl})}}{\tanh\left(\frac{m_{pl}l_{pl}}{2}\right)} + \frac{\sqrt{(h\lambda_{npl}S_{npl}P_{npl})}}{\tanh\left(\frac{m_{npl}l_{npl}}{2}\right)}} \quad (24)$$

Considerando-se a geometria do sensor utilizado, a qual é cilíndrica:

$$\vartheta_{juncao} = \frac{q_{Peltier}}{\frac{\pi}{2} \left[\frac{(d+2\delta)\sqrt{h\lambda_{eq}(d+2\delta)}}{\tanh\left(\frac{m_{pl}l_{pl}}{2}\right)} + \frac{d\sqrt{h\lambda_{npl}d}}{\tanh\left(\frac{m_{npl}l_{npl}}{2}\right)} \right]} \quad (25)$$

Como mostrado no Capítulo 2, o fluxo de calor gerado por efeito Peltier é dado por:

$$q_{Peltier} = [\alpha_{npl}(T_{juncao}) - \alpha_{eq}(T_{juncao})] T_{juncao} I \quad (26)$$

onde:

α_{eq} : poder termoelétrico da região plaqueada [V/K];

α_{npl} : poder termoelétrico da região não plaqueada [V/K];

$$T_{juncao} = T_{amb} + \vartheta_{juncao} \quad [K];$$

I : corrente injetada no sensor [A].

A Eq.24 e a Eq.26 representam um sistema de duas equações e duas incógnitas. Sua resolução pode ser feita por substituição ou por um sistema iterativo simples, onde se admite que inicialmente T_{juncao} é igual a T_{amb} ($\vartheta_{juncao} = 0$ K).

A tensão gerada no termopar a eletrodos depositados é obtida como o mostrado no Capítulo 2, através da Eq.27.

$$V_{Seeb} = [\alpha_{npl}(T_{amb}) - \alpha_{eq}(T_{amb})](T_{J1} - T_{J2}) \quad (27)$$

onde:

V_{Seeb} : tensão no termopar [V];

$T_{J1} - T_{J2}$: diferença de temperatura entre as junções do termopar a eletrodos depositados [K].

Sendo assim, o sensor pode ser simulado de forma a se determinar a espessura ótima do depósito, comprimento ótimo das células, etc. Os códigos escritos para esse fim encontram-se em anexo.

4.2 Resultados das simulações

Os dados obtidos por simulação são referentes aos materiais utilizados na construção dos sensores, sendo que o fio de suporte é constantan e o material de plaqueamento cobre.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos é necessário definir a estrutura do sensor simulado. Ela está representada na Figura 34, onde percebe-se que o sensor, constituído por um número n de células, é ligado ao suporte sempre através das regiões plaqueadas.

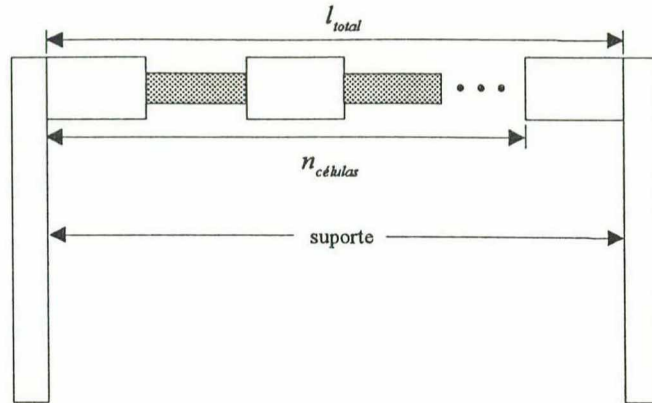


Figura 34: Estrutura do sensor

Com isso, o número de células em um determinado comprimento fixo do sensor (l_{total}) é dado por:

$$n_{células} = \frac{l_{total} - l_{pl}}{l_{cel}} \quad (28)$$

Para l_{pl} , l_{npl} , velocidade do ar, corrente injetada e d fixos, variando-se a espessura do depósito a tensão Seebeck (V_{seeb}) por célula varia. Essa variação está representada na Figura 35, na qual percebe-se que há um ponto onde V_{seeb} é máxima. Portanto, para cada valor de l_{pl} e l_{npl} há uma espessura ótima que provoca V_{seeb} máxima. A Figura 36 mostra $\delta_{ótimo}$ em função de l_{pl} e l_{npl} .

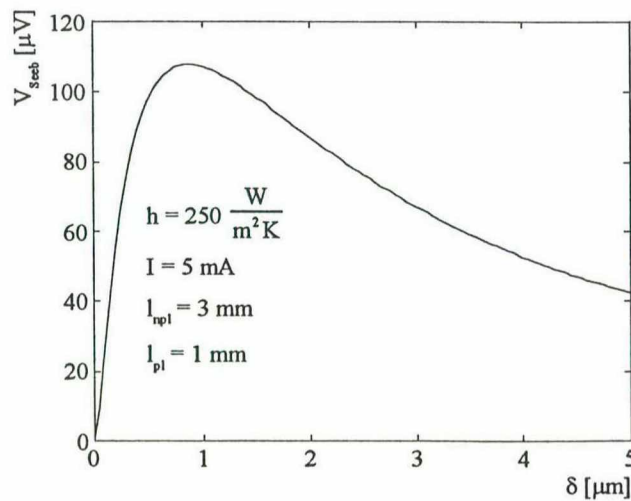


Figura 35: Tensão Seebeck em função de δ ($d = 25 \mu\text{m}$)

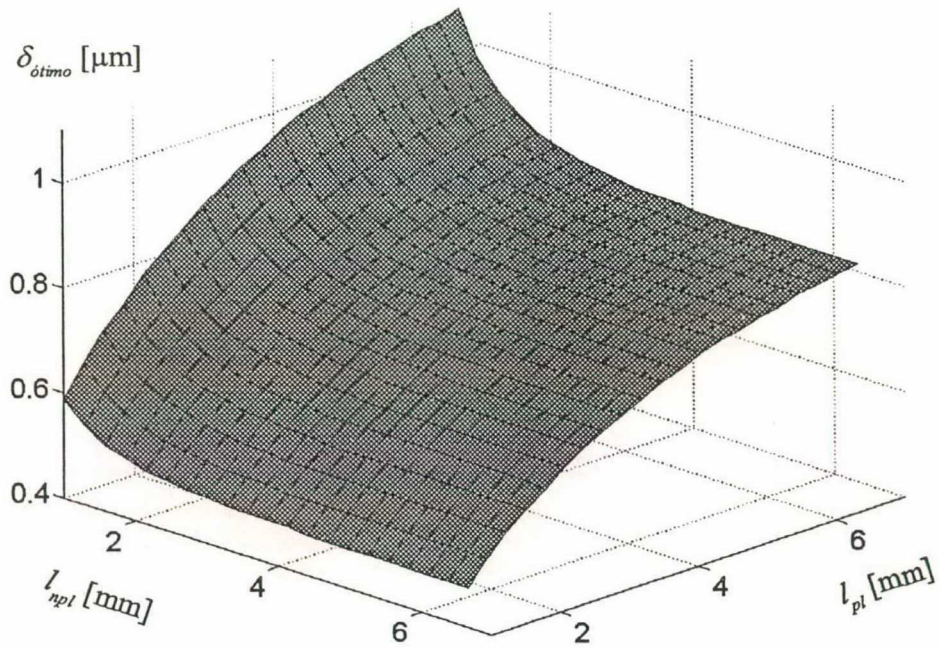


Figura 36: $\delta_{\text{ótimo}}$ em função de l_{npl} e l_{pl}

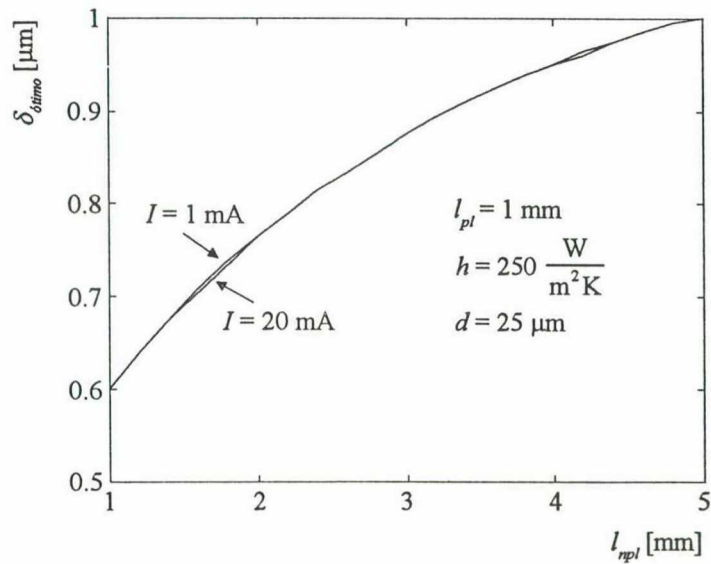


Figura 37: Variação de $\delta_{\text{ótimo}}$ em função de I

A Figura 37 e a Figura 38 mostram a dependência de $\delta_{\text{ótimo}}$ com a variação da corrente

injetada I e a velocidade do ar. Observa-se que a variação de I altera pouco $\delta_{\text{ótimo}}$ e as curvas são praticamente coincidentes para os dois níveis de corrente simulados. Já a variação da velocidade do ar provoca alterações maiores em $\delta_{\text{ótimo}}$; no entanto, essas variações são muito pequenas para a faixa de velocidade de medição planejada para o anemômetro ($0.2 \text{ m/s} \leq u \leq 1 \text{ m/s}$). Então, a partir desse ponto, será considerado que a dependência de $\delta_{\text{ótimo}}$ com a variação de I e a velocidade do ar é desprezível.

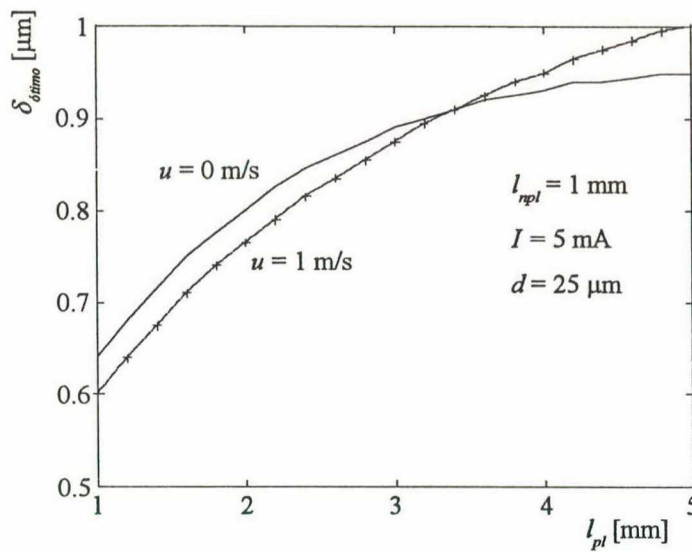


Figura 38: Variação de $\delta_{\text{ótimo}}$ em função da velocidade do ar

A partir desse ponto todos os resultados de simulação obtidos serão mostrados considerando-se $\delta = \delta_{\text{ótimo}}$.

A tensão total gerada no sensor é dada por:

$$V_{\text{Sensor}} = n_{\text{células}} V_{\text{Seeb}} \quad (29)$$

Com essa definição e a de $\delta_{\text{ótimo}}$ torna-se possível gerar o gráfico mostrado na Figura 39. Observa-se que V_{Sensor} aumenta conforme o comprimento das células termoeletricas diminuem, o que é natural já que essa diminuição provoca o aumento do número de células.

No entanto, o aumento do número de células para um mesmo comprimento do sensor causa alterações na sensibilidade do mesmo. A demonstração dessa alteração é executada a partir da Eq. 25. Considerando-se que $\tanh(x) \approx x$ se $x \ll 1$, se l_{pl} e l_{npl} forem suficientemente pequenos as

seguintes aproximações são válidas:

$$\tanh\left(\frac{m_{pl} l_{pl}}{2}\right) \approx \frac{m_{pl} l_{pl}}{2} \quad (30)$$

$$\tanh\left(\frac{m_{npl} l_{npl}}{2}\right) \approx \frac{m_{npl} l_{npl}}{2} \quad (31)$$

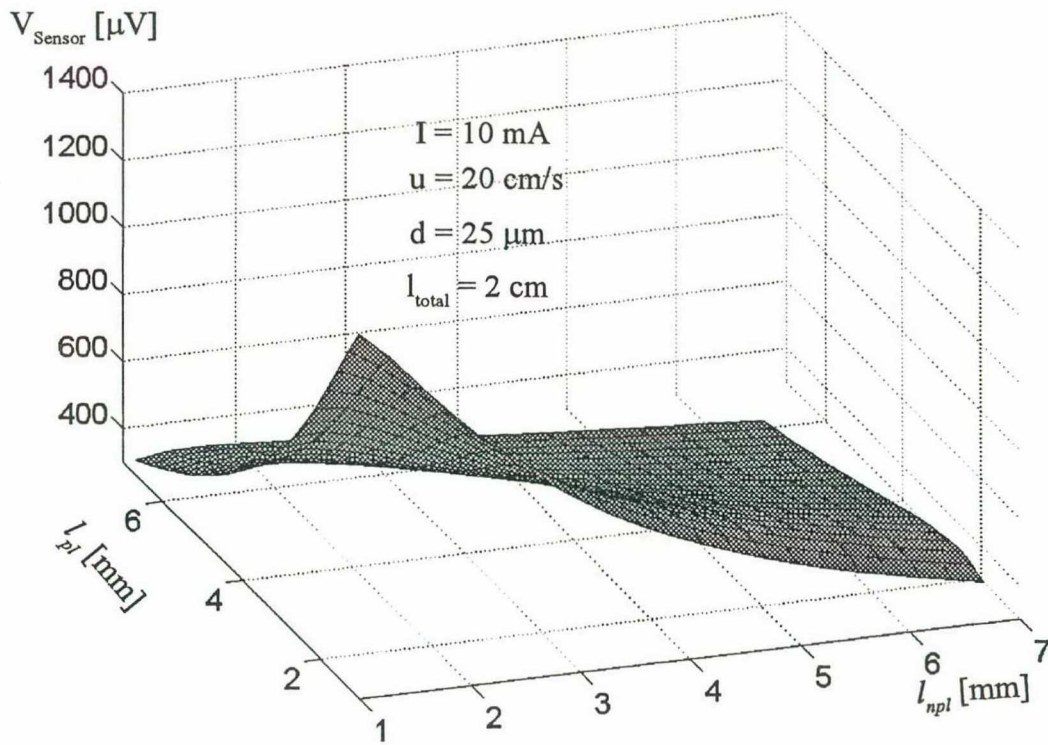


Figura 39: V_{Sensor} em função de l_{npl} e l_{pl}

Com essas aproximações a Eq.25 fica reduzida a:

$$\theta_{juncao} = \frac{q_{Peltier}}{\pi \left[\frac{\lambda_{eq} (d + 2\delta)^2}{l_{pl}} + \frac{\lambda_{npl} d^2}{l_{npl}} \right]} \quad (32)$$

Observa-se pela Eq.32 que a dependência de θ_{juncao} com h foi anulada. Então a variação de

θ_{juncao} com h e, conseqüentemente, com a velocidade do ar, é reduzida com a diminuição de l_{pl} e l_{npl} . Isso significa uma redução na sensibilidade do sensor. Para uma melhor análise desse efeito torna-se necessário estabelecer a definição de sensibilidade para o sensor. Tal definição é dada pela Eq.33.

$$sensibilidade_{Sensor} = \left| \frac{V_{u2} - V_{u1}}{u2 - u1} \right| \quad \left[\frac{V}{m/s} \right] \quad (33)$$

onde:

$u1$: velocidade de referência [m/s];

$u2$: velocidade de referência adicionada de um incremento [m/s];

V_{u1} : tensão no sensor para $u1$ [V];

V_{u2} : tensão no sensor para $u2$ [V].

A partir dessa definição, é possível traçar o gráfico da sensibilidade do sensor em função dos seus parâmetros dimensionais, conforme o mostrado na Figura 40. Os resultados obtidos para a maximização da sensibilidade para a velocidade de 20 cm/s são dados na Tabela 3, a qual mostra que, para um fio de constantan de 25 μm de diâmetro e 2 cm de comprimento, a máxima sensibilidade é obtida para regiões plaqueadas com comprimento de 1,85 mm e espessura 0,7 μm , espaçadas de 1,85 mm. Conforme já explicado, a espessura da região plaqueada varia pouco com a velocidade do ar; no entanto, as equações utilizadas exigem a definição de uma velocidade. Utilizou-se para os cálculos a velocidade 20 cm/s por ela ser, a princípio, a mais baixa velocidade a ser medida pelo anemômetro.

Tabela 3: Dimensões para maximização da sensibilidade a 20 cm/s ($d = 25 \mu m$ e $l_{total} = 2 cm$)

l_{pl} [mm]	l_{npl} [mm]	δ [μm]	$sensibilidade_{Sensor}$ $\left[\frac{\mu V}{m/s} \right]$
1.85	1.85	0.7	620

Além da análise da sensibilidade, também é interessante analisar a influência de l_{pl} e l_{npl} na temperatura média do sensor. Um acréscimo excessivo na temperatura média gera movimentos convectivos perturbando a medição. Ou seja, o sensor induz uma movimentação do ar ao seu redor, devido a esse acréscimo na sua temperatura média, e a interpreta como movimentação global do ar. E, como a faixa de medição desse anemômetro está situada em baixas velocidades, é interessante

minimizar esse efeito. Um método de análise é apresentado a seguir.

A resistência do sensor, considerando-se que o mesmo é constituído por elementos que podem ser associados de forma equivalente a resistores (Figura 41), é dada por:

$$R_{\text{sensor}} = n_{\text{células}} R_{\text{célula}} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = n_{\text{células}} \left(R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (34)$$

o que leva a:

$$R_{\text{sensor}} = \frac{4}{\pi} \left(n_{\text{células}} \frac{\rho_{\text{npl}} l_{\text{npl}}}{d^2} + (n_{\text{células}} + 1) \frac{\rho_{\text{npl}} \rho_{\text{pl}} l_{\text{pl}}}{4 \rho_{\text{npl}} \delta (\delta + d) + \rho_{\text{pl}} d^2} \right) \quad (35)$$

onde:

ρ_{npl} : resistividade do material da região não plaqueada [Ωm];

ρ_{pl} : resistividade do material de plaqueamento [Ωm].

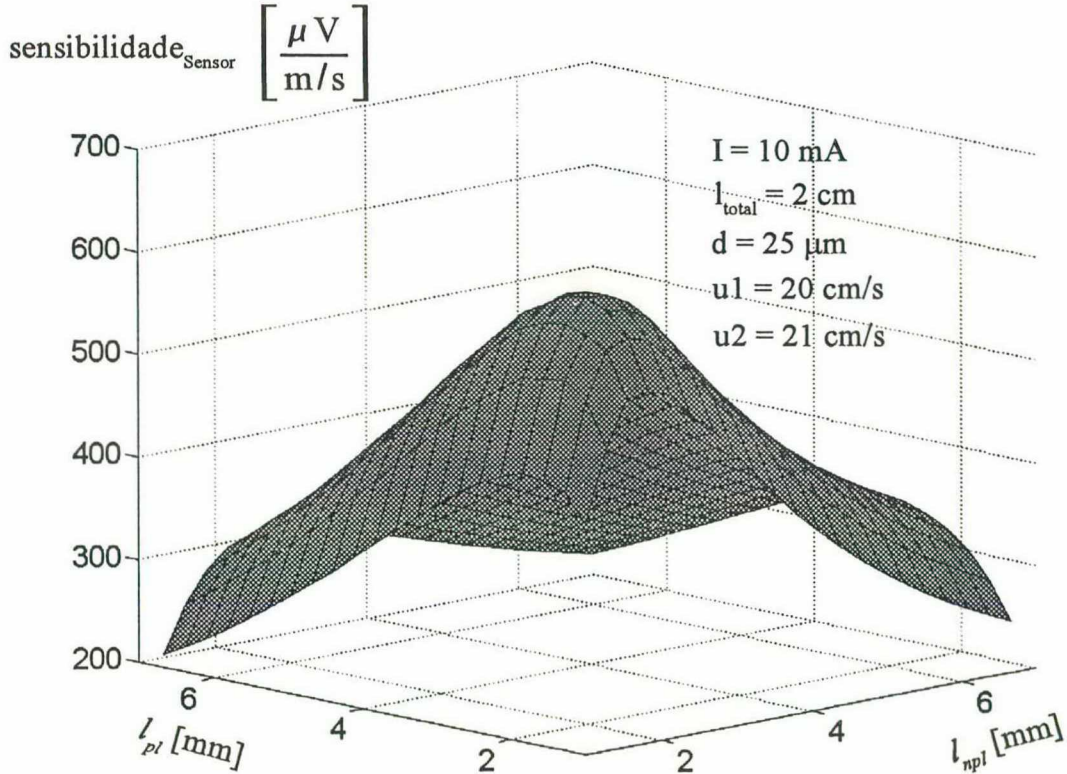


Figura 40: Sensibilidade em função de l_{npl} e l_{pl}

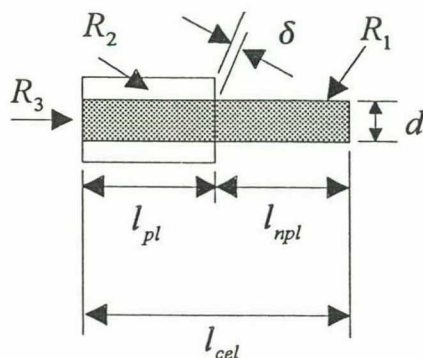


Figura 41: Corte lateral de uma célula do sensor

A potência Joule dissipada no sensor, calculada da forma $q_{Joule} = R_{Sensor} I^2$, é então mostrada na Figura 42.

A Tabela 4 fornece os valores para ρ_{npl} e ρ_{pl} para os materiais utilizados na construção do sensor.

Tabela 4: Resistividade dos materiais usados no anemômetro

<i>Material</i>	<i>Símbolo</i>	Resistividade [$\Omega.m$]
Cobre	ρ_{pl}	1.69×10^{-8}
Constantan	ρ_{npl}	52×10^{-8}

O acréscimo na temperatura média no sensor, devido ao efeito Joule, pode ser calculado de forma simplificada através da relação:

$$q_{Joule} = h A_{média} \vartheta_{Joule\ Médio} \quad (36)$$

onde :

$A_{média}$: área superficial média do sensor [m^2];

$\vartheta_{Joule\ Médio}$: acréscimo na temperatura média do sensor devido ao efeito Joule [$^{\circ}C$].

A área superficial média do sensor é dada por:

$$A_{Média} = A_{npl} \frac{l_{npl} n_{células}}{l_{total}} + A_{pl} \frac{l_{pl} n_{células}}{l_{total}} \Rightarrow A_{média} = \pi \left[d l_{npl} n_{células} + (d + 2\delta) l_{pl} (n_{células} + 1) \right] \quad (37)$$

Considerando-se os resultados obtidos de q_{Joule} (Figura 42) e através da Eq.36 e da Eq.37, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 43.

Observa-se através da Figura 43 que a influência do efeito Joule diminui quando a relação l_{pl} / l_{npl} aumenta. Mas apenas essa informação não é suficiente, pois a sensibilidade do sensor também deve ser considerada. Então é necessário relacionar a sensibilidade do sensor com o acréscimo de temperatura.

Como já explicado no Capítulo 2, a variação da velocidade do ar altera o coeficiente de troca de calor por convecção h e, conseqüentemente, θ_{Joule} . Então é possível definir a variação de θ_{Joule} com velocidade da seguinte forma:

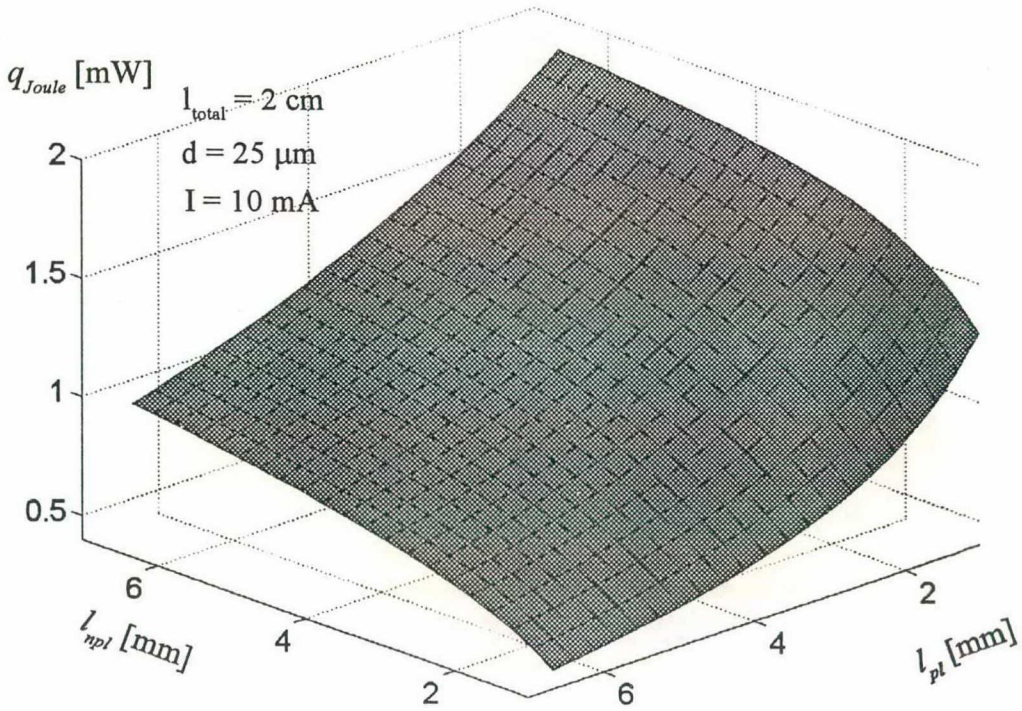


Figura 42: Potência dissipada no sensor em função de l_{npl} e l_{pl}

$$sensibilidade_{Joule} = \left| \frac{\theta_{u2} - \theta_{u1}}{u2 - u1} \right| \quad \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m/s}} \right] \quad (38)$$

onde:

θ_{u1} : acréscimo na temperatura média no sensor para $u1$ [$^{\circ}\text{C}$];

θ_{u2} : acréscimo na temperatura média no sensor para u_2 [°C].

Com essa definição obtém-se o gráfico mostrado na Figura 44.

Com o exposto pode-se relacionar $sensibilidade_{Joule}$ e $sensibilidade_{Sensor}$ da forma dada na Eq.39.

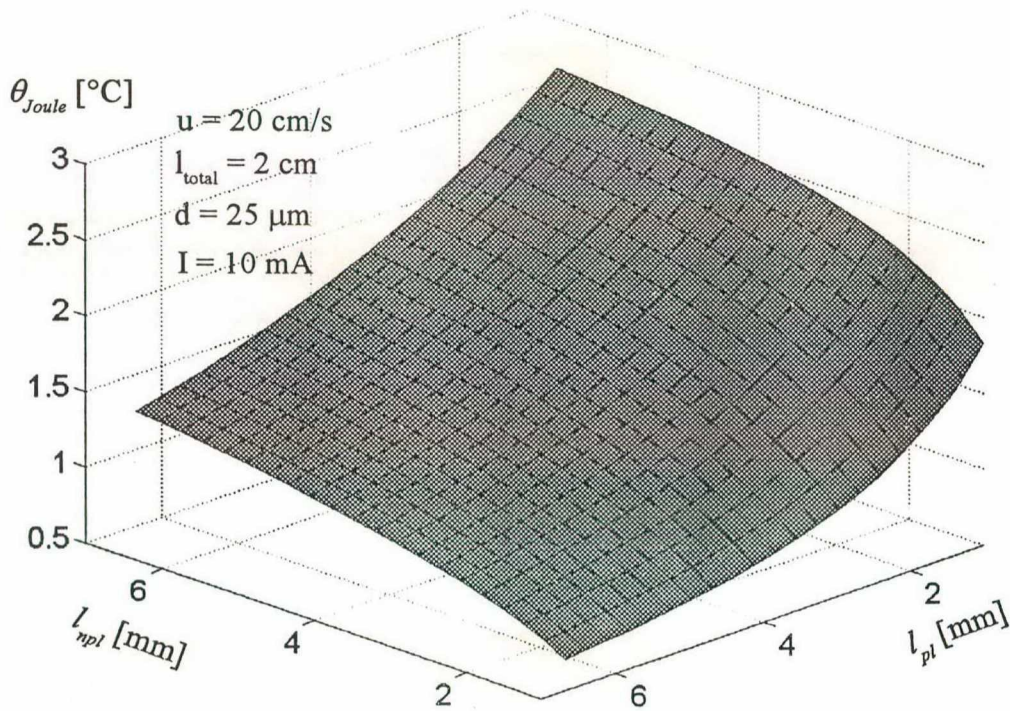


Figura 43: Acréscimo na temperatura média do sensor devido ao efeito Joule

$$\beta = \frac{sensibilidade_{Sensor}}{sensibilidade_{Joule}} \quad \left[\frac{V}{^{\circ}C} \right] \quad (39)$$

O gráfico da Figura 45 mostra a variação de β em função de l_{npl} e l_{pl} . Assim como no caso da sensibilidade do sensor (Figura 40), há um ponto de ótimo. A Tabela 5 compara os parâmetros dimensionais do sensor para a maximização de $sensibilidade_{Sensor}$ e β .

Tabela 5: Comparação entre as maximizações de $sensibilidade_{Sensor}$ e β

Tipo de maximização	l_{pl} [mm]	l_{npl} [mm]	δ [μm]
$sensibilidade_{Sensor}$	1,85	1,85	0,7
β	3,55	1,57	0,85

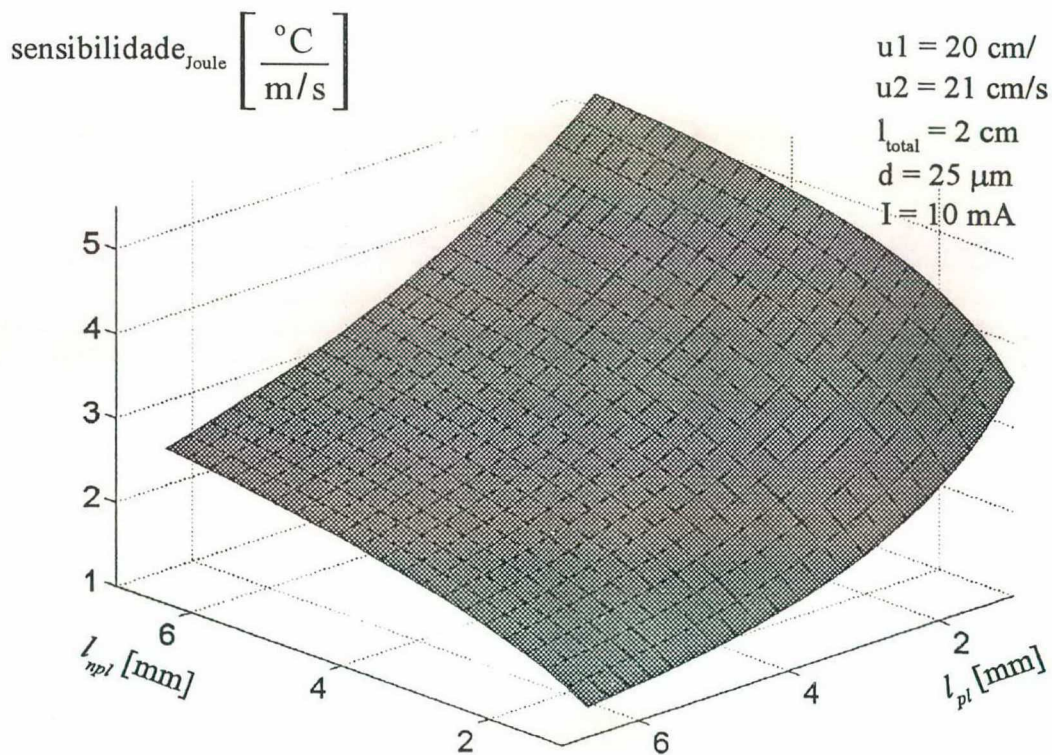


Figura 44: Variação de θ_{Joule} com a velocidade

Como pode ser observado, há pouca mudança nos valores de $sensibilidade_{Sensor}$ e β para os dois casos. No entanto, valores de β maiores significam menores perturbações no escoamento e, conseqüentemente, reduzem o limite inferior de medição de velocidade. Então, para a construção do sensor optou-se pela utilização dos resultados obtidos na maximização de β .

Ressalta-se, nesse ponto, que há limitações tecnológicas no processo de fabricação do sensor, como mostrado no Apêndice 1. Portanto, os parâmetros dimensionais dos sensores construídos não são exatamente os mesmos dos calculados. No entanto, a intenção das simulações não foi a obtenção dos valores exatos desses parâmetros, mas uma forma de se obter uma orientação para a construção do sensor.

Além dos valores obtidos para a maximização de β , também foram construídos sensores com outros valores de l_{npl} , l_{pl} e δ , para efeito de comparação de V_{Seeb} , $sensibilidade_{Sensor}$, etc.

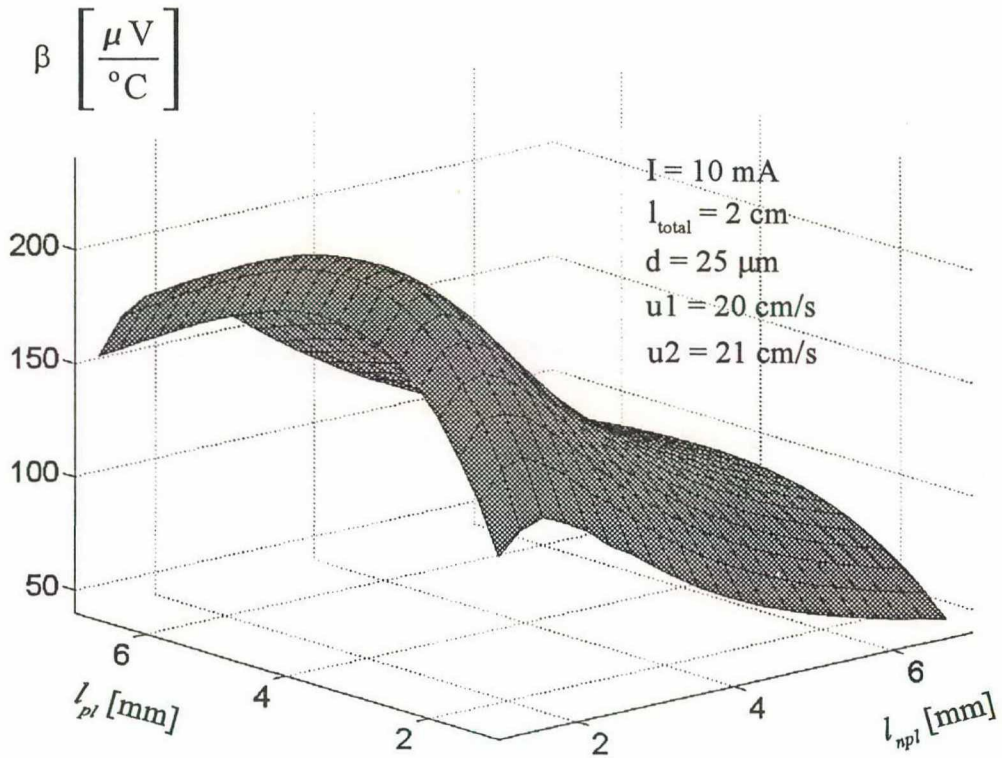


Figura 45: β em função de l_{npl} e l_{pl}

Capítulo 5: Resultados experimentais

5.1 Equipamento para a calibração do anemômetro a efeito Peltier

Para a calibração do anemômetro a efeito Peltier fez-se necessário um sistema que produzisse um deslocamento de ar com velocidade e temperatura conhecidas. O sistema utilizado, mostrado na Figura 46, consistem em duas canalizações concêntricas. O ajuste de temperatura é efetuado através de um banho termostatzado (Figura 48) que controla a temperatura da água que preenche o espaço entre as duas canalizações. O fluxo de ar é ajustado através de medidores do tipo rotâmetro (Figura 47); cada rotâmetro representado na Figura 46 faz a medição para uma determinada faixa de fluxo.

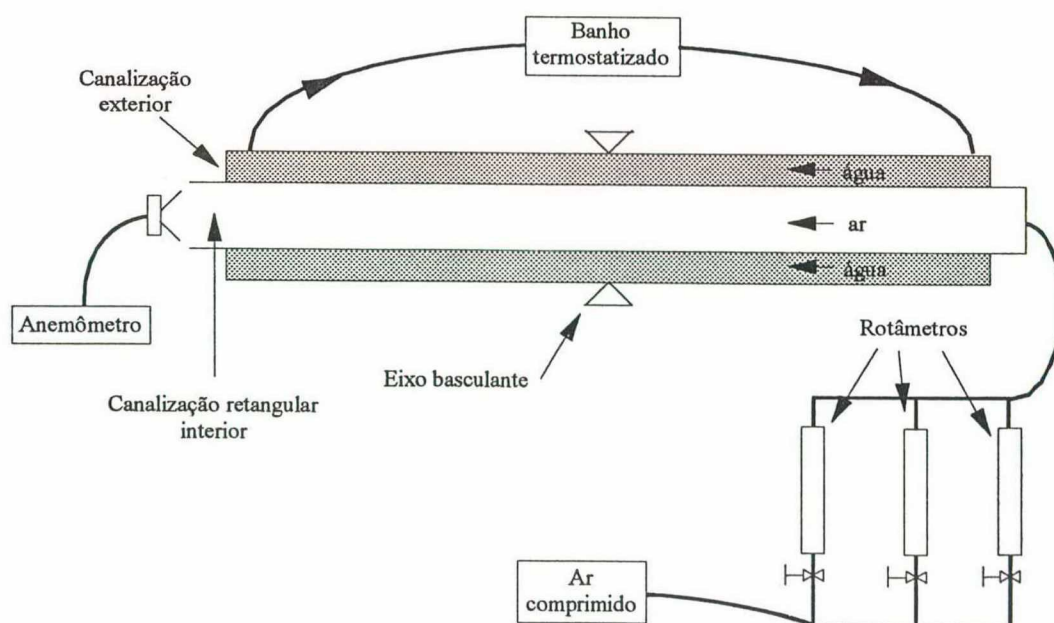


Figura 46: Sistema utilizado para a calibração do anemômetro

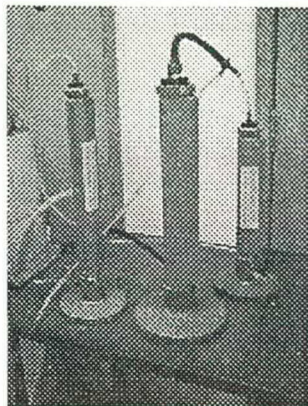


Figura 47: Rotâmetros

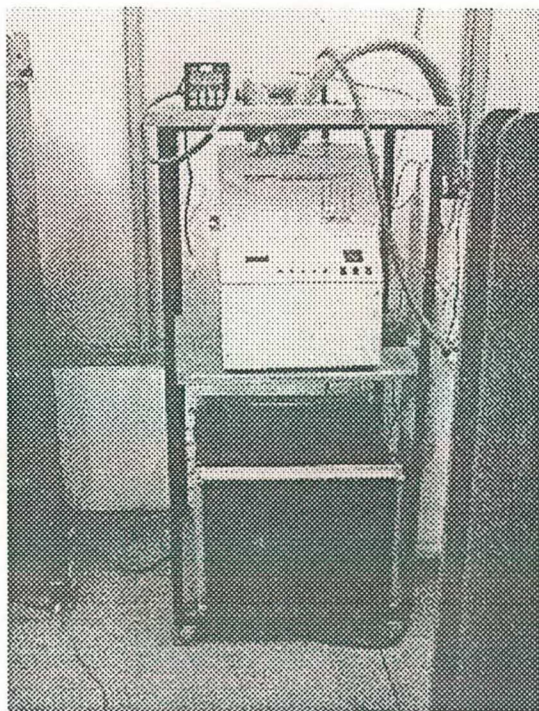


Figura 48: Banho termostatizado

O eixo presente na metade das canalizações possibilita medições em fluxos ascendente, descendente e horizontal, o que é importante para a avaliação da perturbação causada pelo aquecimento do sensor devido ao efeito Joule.

A Figura 49 mostra as dimensões da canalização interna.

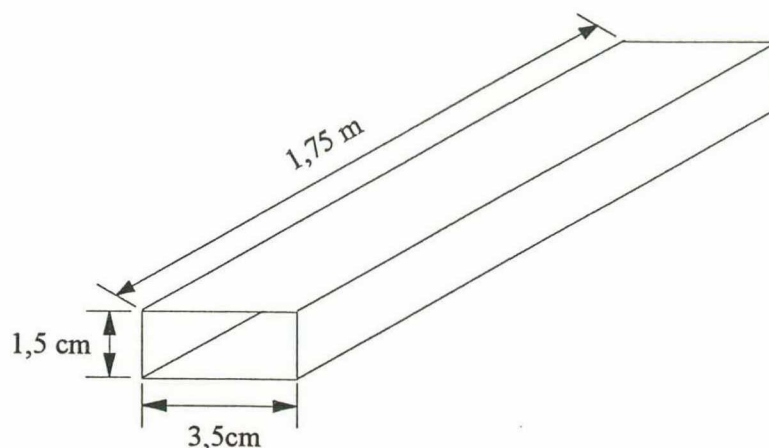


Figura 49: Dimensões da canalização interna

Esse sistema de calibração possibilitou medições na faixa de 0 m/s a 0,8 m/s, a temperaturas variando da ambiente até 45 °C, com uma precisão de $\pm 0,005$ m/s.

5.2 Condições experimentais

5.2.1 Sensores utilizados

Para efeito de comparação foram utilizados dois sensores diferentes em algumas medições. As dimensões desses sensores encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensões aproximadas dos sensores utilizados

	Sensor 1	Sensor 2
l_{pl} [cm]	3,0	3,0
l_{npl} [cm]	1,0	1,0
δ [μm]	2,0	0,9
l_{total} [cm]	2,0	2,0
d [μm]	25,0	25,0

O suporte utilizado para a colocação dos fios é mostrado na Figura 50. Adotando-se essa forma de construção deve-se tomar maiores cuidados na avaliação da direção do fluxo de ar para que não seja perturbado pela haste; no entanto, o sensor torna-se um pouco mais robusto devido às proteções nas laterais.

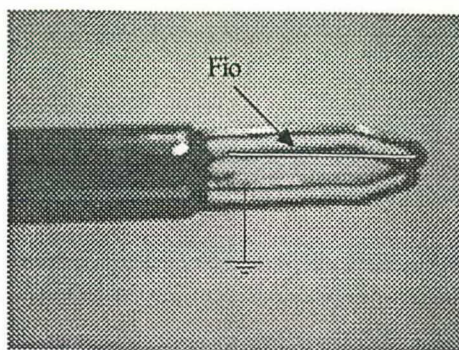


Figura 50: Montagem do sensor

5.2.2 Corrente injetada no sensor

A corrente injetada no sensor, cuja forma já foi discutida anteriormente, possui as temporizações mostradas na Figura 51. Os tempos adotados são os mais rápidos possíveis para que o microcontrolador possa fazer o processamento dos sinais de velocidade e temperatura.

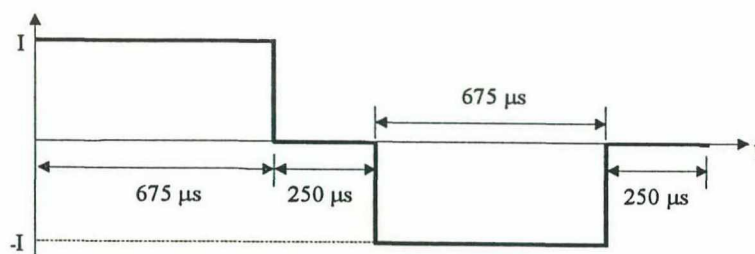


Figura 51: Temporizações dos ciclos de injeção de corrente e leitura do sinal Seebeck

Dessa forma, a corrente média presente no sensor, para cada ciclo positivo ou negativo, é:

$$I_{med+} = 0,73 I$$

$$I_{med-} = -0,73 I$$

Os intervalos totais de injeção de corrente positiva e negativa são dados na Figura 52.

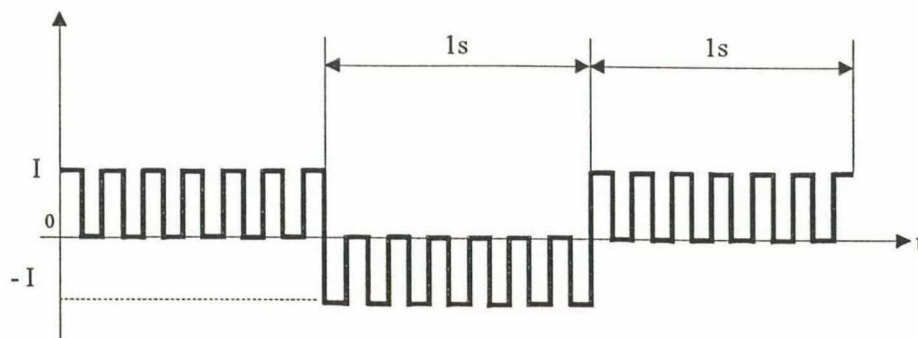


Figura 52: Períodos totais de injeção de corrente positiva e negativa

5.3 Curva de resposta do anemômetro com os sensores 1 e 2

Os gráficos mostrados nas figuras 53 e 54 mostram os pontos obtidos experimentalmente para os sensores 1 e 2 respectivamente. Conforme pode ser observado, a alteração da corrente média injetada produz alterações na amplitude do sinal gerado pelos sensores. Para minimizar a influência do efeito Joule presente no sensor sem que o sinal gerado fosse extremamente baixo, o que prejudicaria a sensibilidade do instrumento, adotou-se, para as medições que serão apresentadas a seguir, uma corrente média de 14,6mA.

Comparando-se os gráficos das figuras 53 e 54 observa-se que o sensor 2 proporcionou sinais de saída maiores do que o sensor 1. Além disso, conforme a Figura 55 mostra, a sensibilidade do anemômetro também é maior para o sensor 2. Isso ocorreu devido ao sensor 2 ter sido construído conforme as regras de otimização apresentadas no Capítulo 4. Ressalta-se que as curvas dadas na Figura 55 são retas devido à utilização de polinômios do 2º grau para a interpolação dos pontos apresentados nas figuras 53 e 54.

Como o sensor 2 foi o que apresentou, conforme o esperado, melhores resultados, as outras medições que serão apresentadas a seguir foram efetuadas somente com esse sensor.

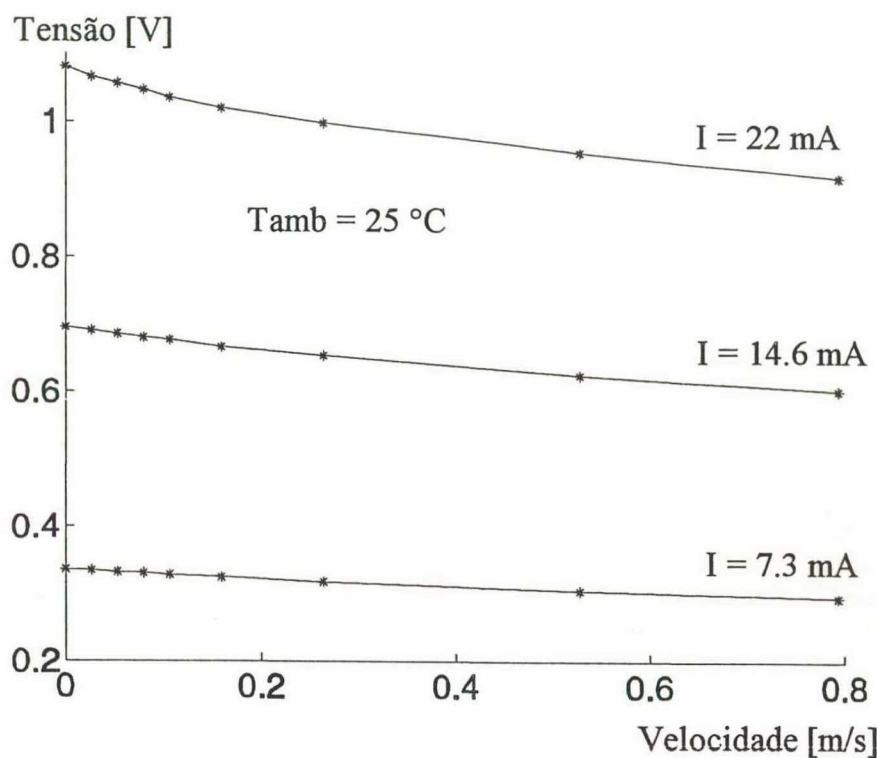


Figura 53: Tensão de saída em função da velocidade variando-se I (sensor 1)

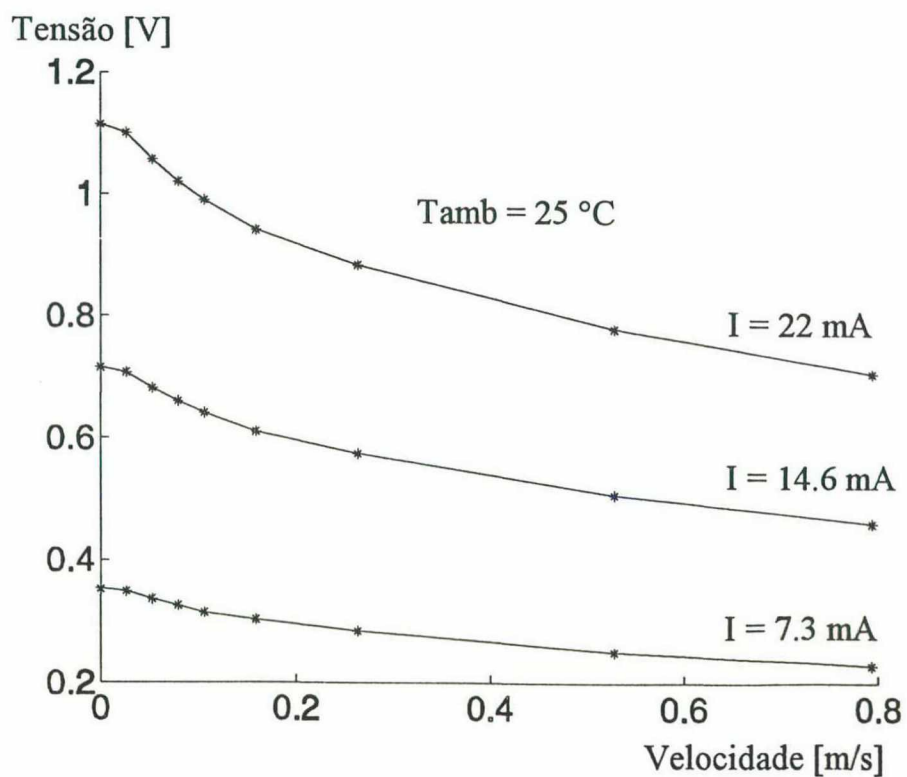


Figura 54: Tensão de saída em função da velocidade variando-se I (sensor 2)

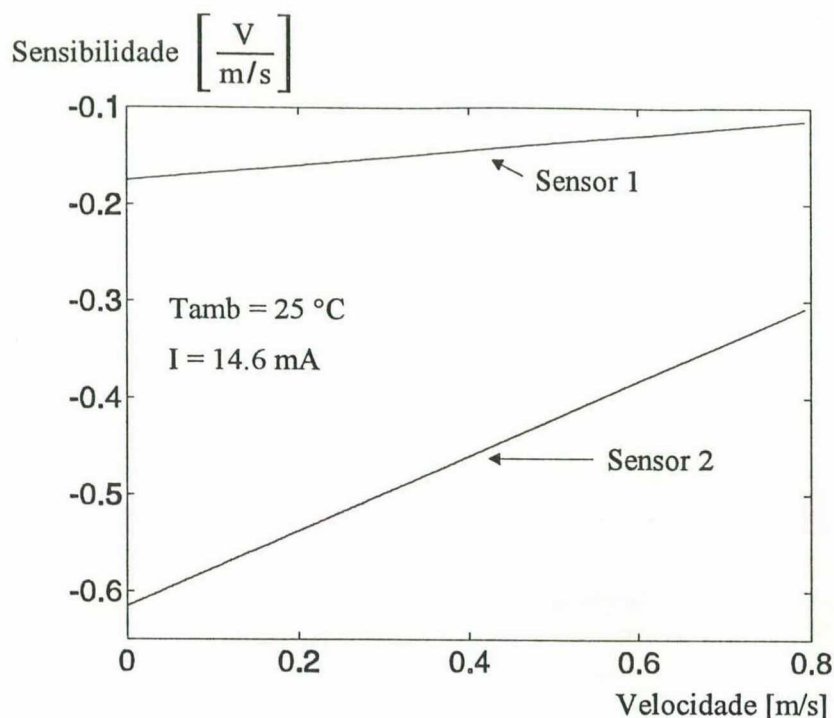


Figura 55: Sensibilidade dos sensores 1 e 2 em função da velocidade

5.4 Estabilidade das medições ao longo do tempo

Para a avaliação da estabilidade das medições do equipamento foram efetuadas duas medições com um intervalo de 10 dias entre as duas. Conforme pode ser visto através dos resultados experimentais mostrados na Figura 56, o protótipo montado possui uma excelente estabilidade ao longo do tempo. Ressalta-se que durante todo o período de avaliação do instrumento, de aproximadamente 3 meses, as curvas de calibração do anemômetro não se alteraram. Os pequenos desvios nas medições são atribuídos à incerteza no ajuste de velocidade através dos rotâmetros.

5.5 Medição da histerese

Um fator importante para o anemômetro é que possua baixa histerese. Conforme a Figura 57 mostra, o protótipo montado não apresentou uma histerese mensurável. Os pequenos desvios nos pontos experimentais obtidos são atribuídos a erros no ajuste de velocidade através dos rotâmetros.

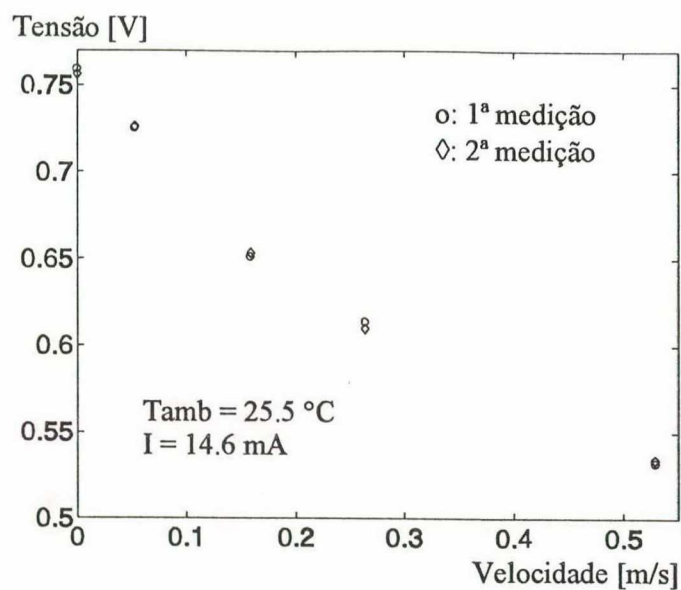


Figura 56: Estabilidade das medidas, sensor 2

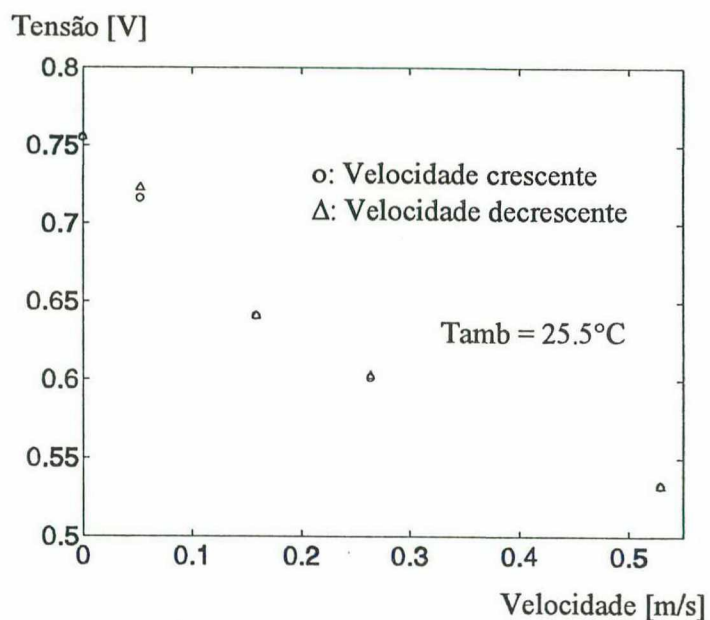


Figura 57: Avaliação da histerese do anemômetro (sensor 2)

5.6 Avaliação da perturbação causada pelo efeito Joule

Conforme já discutido anteriormente, o sensor do anemômetro a efeito Peltier possui um

certo aquecimento devido ao efeito Joule. Esse aquecimento provoca movimentos convectivos em torno do sensor e tais movimentos podem afetar o desempenho do dispositivo em baixas velocidades. Para avaliar esse tipo de perturbação o equipamento de calibração do anemômetro foi construído com um eixo de forma a possibilitar um grau de liberdade. Assim, conforme mostra a Figura 58, foi possível fazer medições para deslocamentos de ar horizontais, ascendentes e descendentes. Caso o sensor esteja com uma temperatura média que gere um movimento convectivo significativo, as curvas de calibração serão diferentes. A condição mais crítica é a descendente, na qual o movimento convectivo gerado pelo sensor contrapõe-se ao fluxo de ar expelido pelo sistema de calibração. Nesse caso a tensão gerada pelo sensor aumenta até que o fluxo de ar que sai do bocal se iguale ao movimento convectivo gerado pelo sensor.

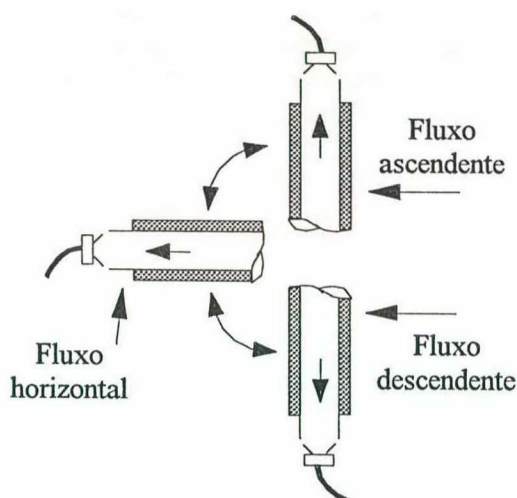


Figura 58: Rotação do sistema de calibração

É desejável que a convecção gerada pelo sensor seja a mínima possível, de preferência não detectável para a faixa de medição do instrumento. Caso isso não ocorra o processo de calibração e a utilização do anemômetro ficam mais complicados, devido à necessidade de considerar em qual dos casos o instrumento está trabalhando.

Os resultados obtidos, mostrados na Figura 59, indicam que a convecção gerada pelo efeito Joule é desprezível. As pequenas diferenças entre os pontos experimentais são atribuídas às incertezas inerentes às medições, tais como temperatura do ar ambiente não homogênea, imprecisões no ajuste de velocidade através dos rotâmetros, etc. Esse resultado representa um grande avanço em relação ao anemômetro apresentado por Güths [1], que apresentou grandes desvios devido ao efeito em questão.

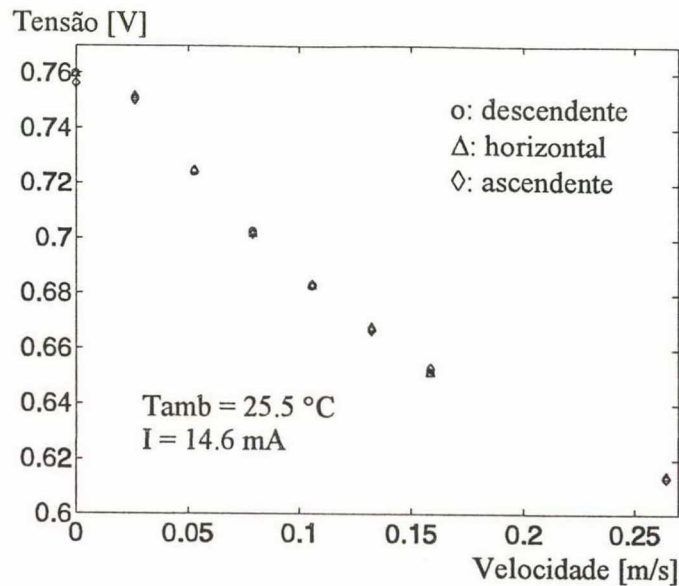


Figura 59: Avaliação do efeito Joule (sensor 2)

5.7 Compensação em temperatura para o sensor 2

O sinal de saída do anemômetro a efeito Peltier também varia em função da temperatura do ar, o que significa que uma forma de compensação deve ser implementada. Como o anemômetro foi construído com a utilização de um microcontrolador, optou-se por medir a temperatura do ar e fazer a compensação via programação.

Com a utilização do sensor 2, obteve-se as curvas de tensão de saída em função da velocidade para algumas temperaturas diferentes, conforme mostra a Figura 60. Esse gráfico mostra os pontos obtidos experimentalmente e suas respectivas curvas de aproximação. As aproximações foram consideradas como sendo polinômios do 2º grau.

As equações que representam essas curvas são da forma:

$$V_{saída} = M_2 u^2 + M_1 u + M_0 \quad (40)$$

onde:

u : velocidade do ar;

$V_{saída}$: tensão lida no anemômetro;

M_2 , M_1 e M_0 : coeficientes da aproximação em função da temperatura do ar.

Os valores de M_2 , M_1 e M_0 , bem como suas respectivas curvas de interpolação, são dados nas figuras 61, 62 e 63.

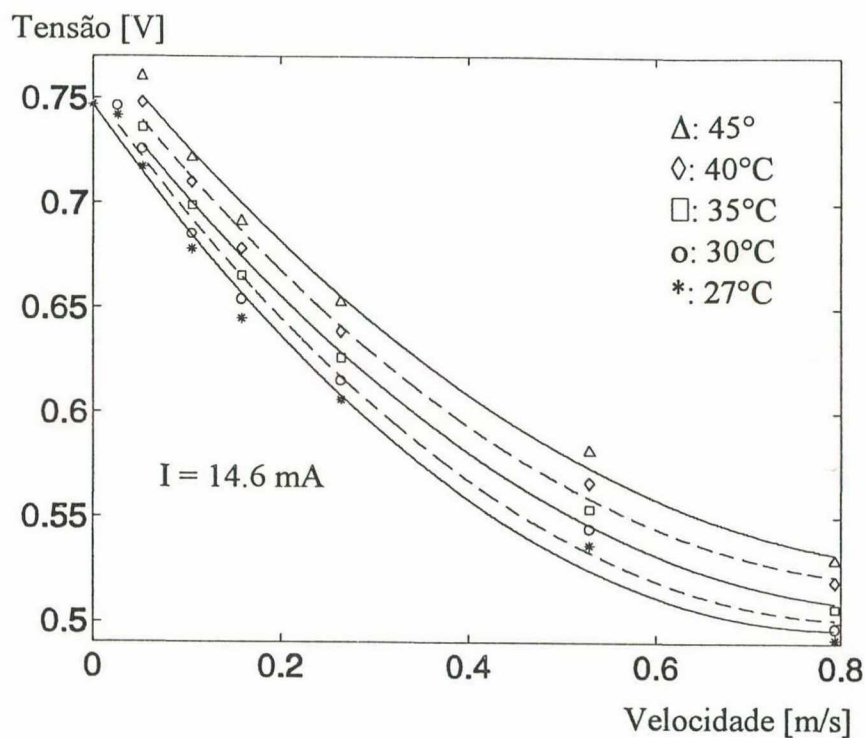


Figura 60: Dependência da tensão de saída com a temperatura do ar (sensor 2)

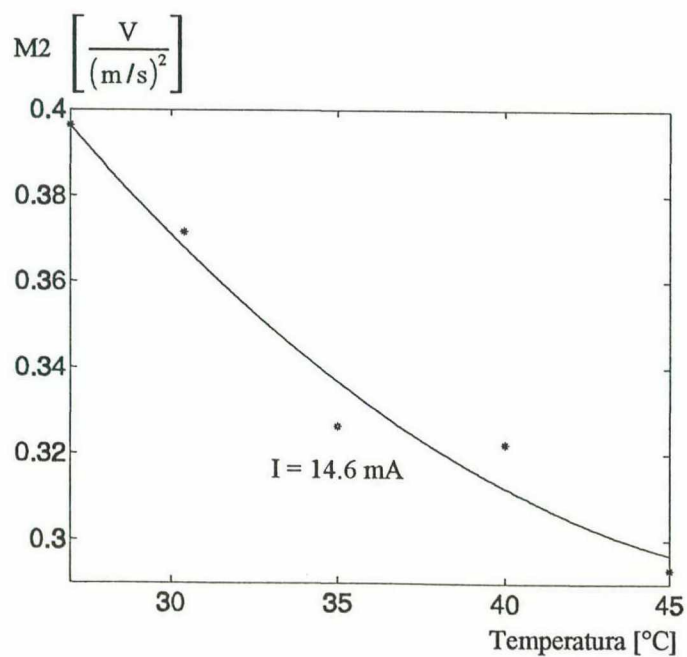


Figura 61: M_2 em função da temperatura (sensor 2)

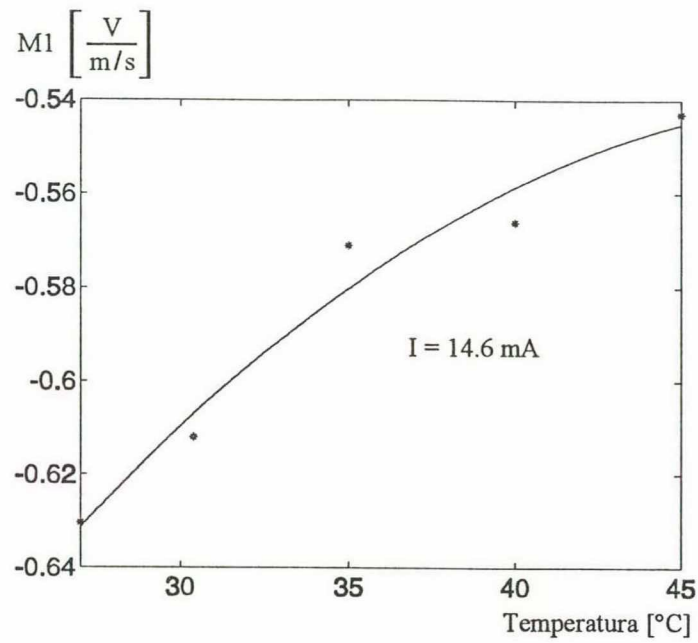


Figura 62: M1 em função da temperatura (sensor 2)

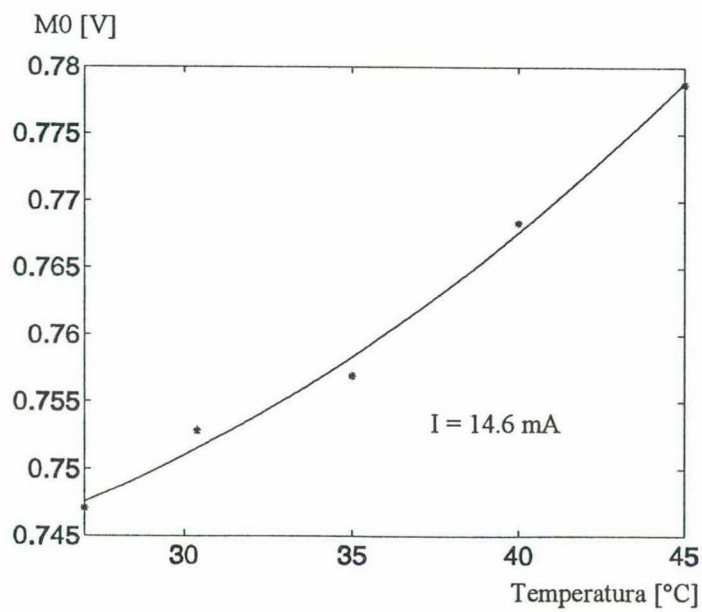


Figura 63: M0 em função da temperatura (sensor 2)

As curvas de interpolação foram obtidas utilizando-se polinômios do 2º grau, o que leva a:

$$M2 = 189,608 \times 10^{-6} T_{amb}^2 - 19,188 \times 10^{-3} T_{amb} + 0,776 \quad (41)$$

$$M1 = -161,003 \times 10^{-6} T_{amb}^2 + 16,375 \times 10^{-3} T_{amb} - 0,956 \quad (42)$$

$$M0 = 38,724 \times 10^{-6} T_{amb}^2 - 1,05 \times 10^{-3} T_{amb} + 0,748 \quad (43)$$

Para a obtenção da tensão de saída compensada em temperatura basta resolver a Eq.40 para os valores adquiridos de tensão de saída e temperatura. Introduzindo-se essas equações no programa de aquisição do anemômetro obtém-se os valores mostrados na Figura 64.

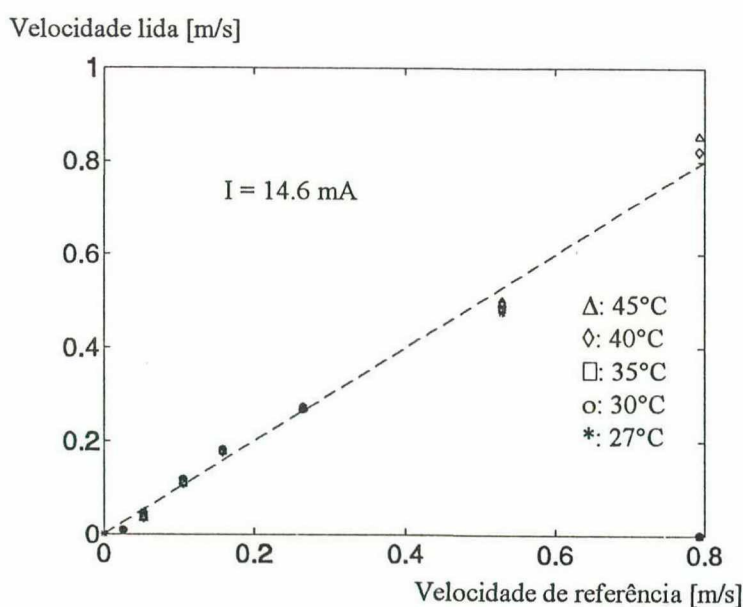


Figura 64: Resultado da calibração (sensor 2)

O método de calibração utilizado proporcionou bons resultados. Observa-se ainda pela Figura 64 a presença de dois pontos em que a velocidade lida é zero enquanto a velocidade de referência é de 0,79m/s. Isso ocorreu devido à programação de compensação efetuada, a qual detecta pontos de medição inválidos. Para a detecção desses pontos verificou-se simplesmente se a Eq.40 possuía solução real.

A fixação dos sensores no bocal de saída do sistema foi efetuado da maneira mostrado na Figura 65. Essa forma de fixação causa imprecisões na calibração do sensor em temperatura para baixas velocidades. Isso ocorre devido ao ar que sai da canalização se misturar com o do ambiente externo, o que consequentemente altera a sua temperatura, antes de atingir o sensor. Para solucionar esse problema não foram efetuadas medições com velocidades inferiores a 5cm/s para temperaturas

da canalização interna diferentes da temperatura do ar do ambiente externo.

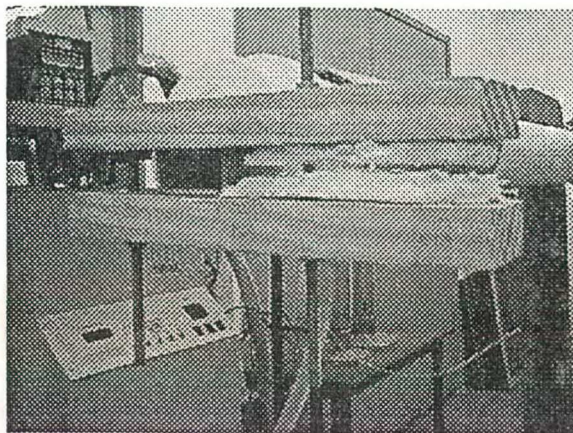


Figura 65: Forma de fixação do sensor no bocal

5.8 Comparação entre valores experimentais e teóricos

O objetivo da análise teórica é dispor de relações que possam qualificar e quantificar os parâmetros envolvidos no sistema.

Como já citado anteriormente, o anemômetro a efeito Peltier é baseado na troca de calor entre o sensor e o ar. Então, para a obtenção da relação entre a velocidade do ar e a tensão de saída do anemômetro, deve-se quantificar essa troca de calor. Devido às complexidades associadas ao escoamento em torno de um cilindro, as equações que relacionam a velocidade do ar e a troca de calor entre o ar e o cilindro são empíricas.

Há várias correlações propostas por diferentes autores para avaliar a troca de calor entre um cilindro circular e um escoamento transversal. Quando as trocas são devidas a movimentos de convecção natural as correlações são parametrizadas em função do número de Rayleigh, definido, para um cilindro, por [14]:

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) d^3}{\nu \alpha_{ar}} \quad (44)$$

onde:

g : gravidade [m/s^2];

β : coeficiente de expansão térmica do gás [T^{-1}];

T_s : temperatura da superfície do cilindro [K];

T_{∞} : temperatura ambiente [K];
 d : diâmetro do cilindro;
 ν : viscosidade cinemática do gás [m²/s];
 α : difusividade térmica do gás [m²/s].

Quando as trocas são devidas a movimentos de convecção forçada, o parâmetro é o número de Nusselt (Nu), definido, para um cilindro, por [14]:

$$Nu = \frac{h d}{\lambda_{ar}} \quad (45)$$

onde:

h : coeficiente de troca de calor por convecção $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$;

d : diâmetro do cilindro [m];

λ_{ar} : condutividade térmica do ar $\left(0,0263 \frac{W}{m K} \right)$.

Como já mostrado nas medições experimentais, as trocas de calor presentes no sensor acontecem predominantemente por convecção forçada. Dessa maneira a análise será efetuada considerando as trocas exclusivamente por convecção forçada. Entre as várias correlações propostas, Zhukauskas [15] sugeriu a seguinte correlação:

$$Nu = C Re^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (46)$$

onde:

C : coeficiente de arraste;

Pr : número de Prandtl avaliado para a temperatura média do fluido;

Pr_s : número de Prandtl avaliado para a temperatura da superfície do cilindro;

Re : número de Reynolds.

Admitindo-se que $Pr \cong Pr_s$, a Eq.46 fica simplificada a:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (47)$$

Essa suposição simplifica consideravelmente os cálculos, já que a temperatura na superfície do sensor não é conhecida a priori. A imprecisão gerada é pequena, pois uma das características do anemômetro a efeito Peltier é o baixo aquecimento do elemento sensor; além disso, o número Prandtl varia pouco para o ar.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{u d}{\nu_{ar}} \quad (48)$$

onde:

u : velocidade do ar $\left[\frac{m}{s} \right]$;

ν_{ar} : viscosidade cinemática do ar $\left(1,84 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \right)$.

Os valores de C e de m dependem do número de Reynolds, conforme mostra a Tabela 7. O valor de n é associado ao número de Prandtl. Se $Pr > 10$, $n = 0,36$. Se $Pr \leq 10$, $n = 0,37$. Para as simulações considerou-se $n = 0,37$.

Tabela 7: Constantes para a equação de Zhukauskas

Re	C	m
1 - 40	0,75	0,4
40 - 1000	0,51	0,5
1000 - 2×10^5	0,26	0,6
2×10^5 - 10^6	0,076	0,7

Com essas considerações e substituindo-se a Eq.45 na Eq.47 chega-se a:

$$h = \frac{22,905 \times 10^{-3}}{d} C Re^m \quad (49)$$

Uma outra correlação, proposta por Churchill e Bernstein [16], é dada por:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{0.5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{0.25}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (50)$$

Substituindo-se a Eq.45 na Eq.50 e com as considerações anteriores:

$$h = \frac{0,0263}{d} \left\{ 0,3 + 485,675 \times 10^{-3} \times Re^{0.5} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \right\} \quad (51)$$

A Figura 66 mostra o coeficiente h para os dois casos.

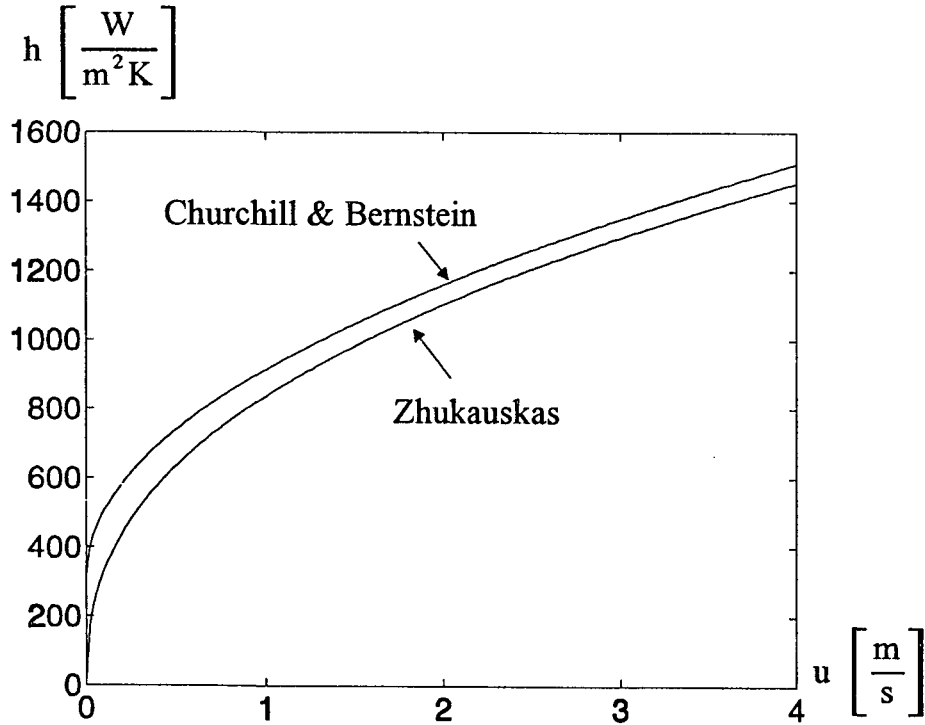


Figura 66: Comparação entre as duas correlações apresentadas ($d = 25$ mm)

Com esses dois métodos de avaliação do coeficiente de troca de calor é possível comparar os resultados obtidos teoricamente com os experimentais, conforme mostra a Figura 67. Nota-se que há diferenças nos valores obtidos; no entanto, essas diferenças são causadas basicamente pelas incertezas dos modelos utilizados, possuem erros da ordem de 20%, e imprecisões na fabricação do sensor, as quais geram imprecisões na avaliação dos comprimentos das células. Com essas

considerações conclui-se que os resultados obtidos são satisfatórios, o que valida os modelos teóricos utilizados para a otimização do sensor.

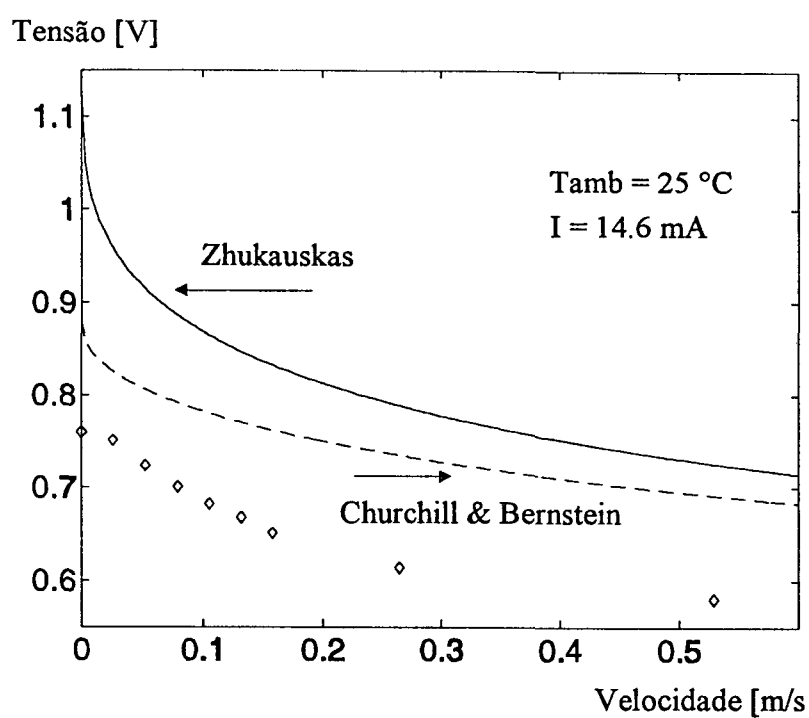


Figura 67: Comparação entre valores teóricos e experimentais (sensor 2)

Conclusão

O anemômetro a efeito Peltier desenvolvido durante a dissertação é um aperfeiçoamento do dispositivo proposto por Güths [1] e cumpriu os objetivos que motivaram a execução desse trabalho: a redução do nível de ruído do sinal de saída, compensação em temperatura e simplificação de seus circuitos eletrônicos com a utilização de um microcontrolador.

A excitação do sensor no modo corrente, ao invés de no modo tensão, proporcionou uma forma mais direta no relacionamento da excitação com o efeito Peltier, além de eliminar a dependência do sinal de saída com a resistência do sensor. A utilização de um microcontrolador permitiu uma maior flexibilização nos ajustes dos ciclos de injeção de corrente e leitura do sinal Seebeck, sendo que no protótipo construído esses ajustes podem ser feitos alterando-se o programa residente no microcontrolador. O microcontrolador utilizado também proporcionou a realização da comunicação com um microcomputador do tipo PC, útil para a aquisição dos sinais, e a compensação de temperatura de forma simples.

Com as melhorias efetuadas no circuito de geração da corrente de excitação e na otimização das dimensões do sensor obteve-se um instrumento capaz de medir velocidades a partir de 5 cm/s até 80cm/s, o que significa uma excelente sensibilidade. Com esse desempenho o anemômetro a efeito Peltier torna-se mais atrativo para medições em baixas velocidades do que os anemômetros a fio quente, já que esses últimos, para medir velocidades inferiores a 0,5 m/s, necessitam de circuitos e técnicas de calibração mais complexos.

Caso a formação das células do sensor fosse controlada de forma mais adequada também haveria ganhos no desempenho do anemômetro; no entanto, o aprimoramento das técnicas de formação das células está fora do escopo desse trabalho.

Ressalta-se que o anemômetro a efeito Peltier destina-se a efetuar medições de velocidades cujas amplitudes variem lentamente, o que representa uma desvantagem em relação aos anemômetros a fio quente. Isso deve-se à baixa velocidade de resposta do instrumento (de, aproximadamente, 1s). Esse tempo de resposta elevado, conforme demonstrado, é devido aos fenômenos térmicos presentes no sensor e não à eletrônica desenvolvida. Melhores resultados podem ser obtidos, por exemplo, com a diminuição do diâmetro do fio de constantan. Isso não foi realizado devido a problemas no manuseio do sensor, já que a resistência mecânica do fio de constantan seria reduzida. Além disso, as oscilações de velocidade para as aplicações nas quais o anemômetro a efeito Peltier se destina são mais lentas do que o seu tempo de resposta.

Com o sistema de calibração construído, o qual proporcionou medições para baixas vazões, temperatura do ar controlada e fluxos de ar descendentes, ascendentes e horizontais, foi possível

avaliar que o aquecimento do elemento sensor devido ao efeito Joule é muito baixo, a ponto de não ser possível detectar esse aquecimento com a aparelhagem disponível. Essa é uma característica muito importante, pois viabiliza a sua utilização em baixas velocidades.

Observa-se pelos resultados obtidos que o protótipo desenvolvido possui uma excelente estabilidade do sinal de saída ao longo do tempo, o que é importante para instrumentos de medição.

Anexo 1 - Fabricação do sensor

Os sensores do anemômetro a efeito Peltier foram fabricados através da deposição eletrolítica de cobre em um fio de constantan; os passos envolvidos nesse método serão dados a seguir.

Primeiramente as regiões onde o cobre não deve ser depositado são cobertas com algum material de proteção como, por exemplo, esmalte. Isso forma as células do sensor, como o mostrado na Figura 68.

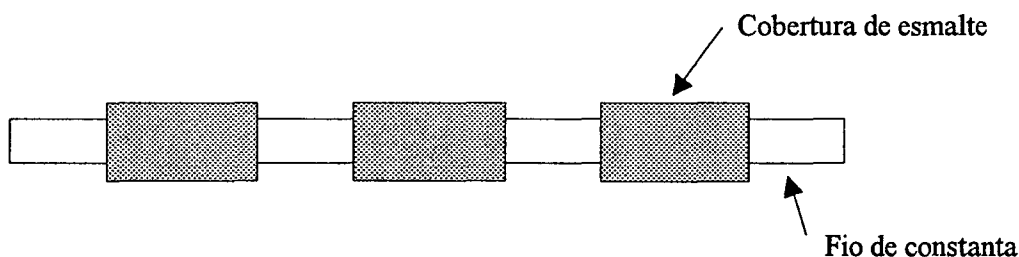


Figura 68: Formação das células através da aplicação de esmalte

Após a aplicação do esmalte o fio é colocado em uma solução que contém os seguintes produtos:

- 1 litro de água;
- 50 g de ácido sulfúrico (H_2SO_4);
- 250 g de sulfato de cobre (CuSO_4);
- 5 g de ácido nítrico (HNO_3).

A Figura 69 mostra como o fio deve ser colocado na solução e a ligação da fonte que supre a corrente necessária à deposição.

Com as condições apresentadas será estabelecida uma corrente de 3A/dm^2 e a deposição se dará a uma taxa de $2,5\text{ }\mu\text{m/min}$.

Observa-se pela Figura 69 a presença de uma placa de constantan e um segundo fio nos quais haverá deposição. A placa de constantan é necessária para equalizar as áreas dos eletrodos. Já o segundo fio, chamado de fio de referência, é usado para a verificação da deposição de cobre. Essa verificação não é feita no próprio sensor devido às imprecisões nas demarcações das células. Com um fio no qual a deposição se dá em toda a sua extensão é possível prever, com grande precisão,

qual será a sua resistência final. Uma forma de determinar a resistência do fio de referência é considerá-lo como uma associação de dois resistores em paralelo, sendo que um resistor representa o fio de constantan e o outro o depósito de cobre, como mostrado na Figura 70.

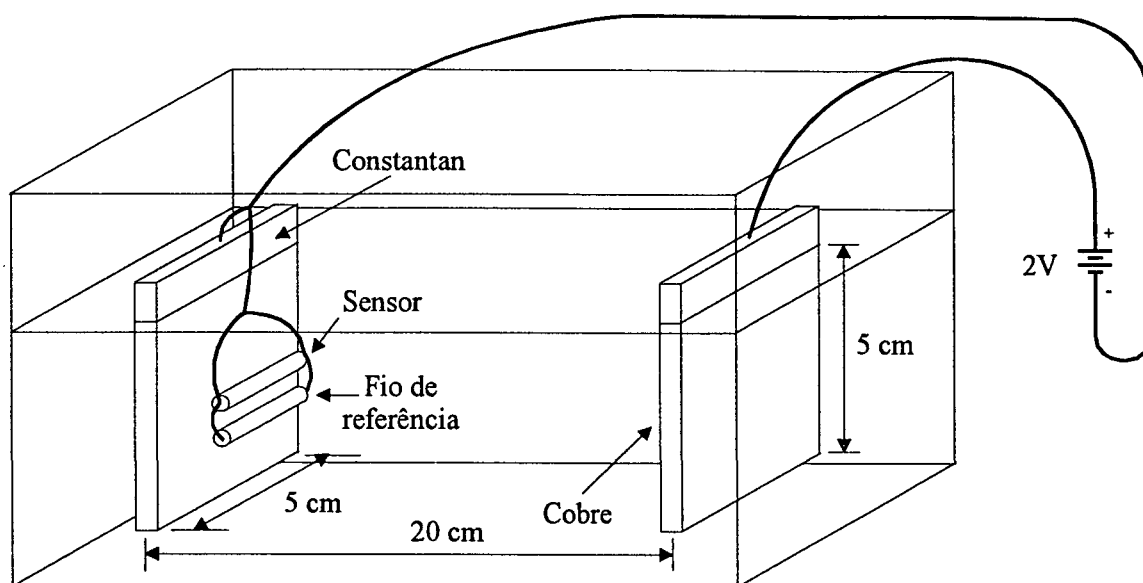


Figura 69: Montagem do banho eletrolítico

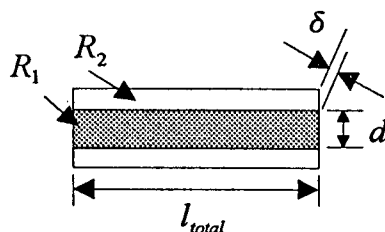


Figura 70: Fio de referência,
corte lateral

Dessa forma, a resistência total do fio é dada por:

$$R_{total} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{Co} \rho_{Cu} l_{total}}{4 \rho_{Co} \delta (d + \delta) + d^2 \rho_{Cu}}$$

onde:

ρ_{Cu} : resistividade do cobre ($1,69 \times 10^{-8} \Omega m$);

ρ_{Co} : resistividade do constantan ($52 \times 10^{-8} \Omega m$);

l_{total} : comprimento do fio de referência [m];

δ : espessura do depósito [m];

d : diâmetro do fio de constantan [m];

R_{total} : resistência total do fio de referência [Ω].

Como exemplo a Figura 71 apresenta a resistência em função da espessura do depósito para um fio de constantan com diâmetro de $25 \mu m$ e comprimento 2 cm.

Após a deposição ser efetuada o material de proteção deve ser retirado. Pode-se utilizar benzina para o caso de esmalte.

Ressalta-se que o método de fabricação utilizado possui imperfeições, basicamente por se tratar de um processo manual. Isso faz com que haja imprecisões nos tamanhos das células. No entanto, esse método foi utilizado devido à sua facilidade de implementação, já que o presente trabalho é concentrado na eletrônica envolvida na construção do sensor.

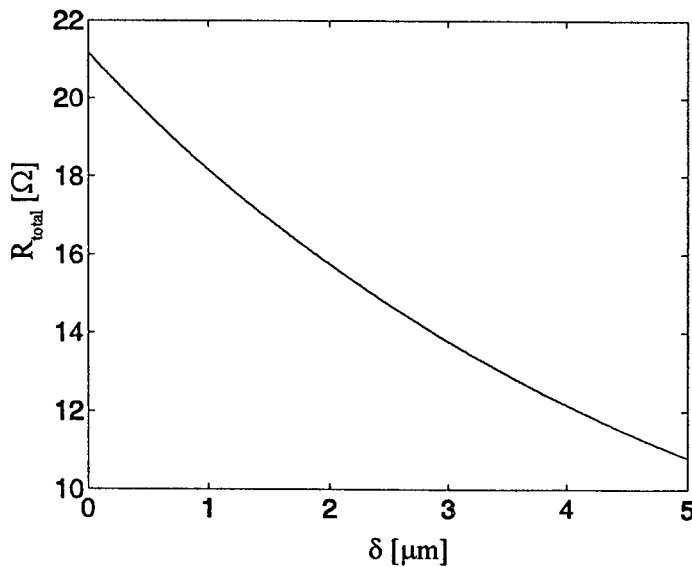


Figura 71: Resistência do fio de referência em função de δ

($d = 25 \mu m$, $l_{total} = 2 cm$, $T_{amb} = 25^\circ C$)

Anexo 2 - Códigos para simulação em MATLAB

- Otimização dos parâmetros dimensionais do sensor

```

clc;
clear;
% Simulação do Anemômetro a Efeito Peltier
% Dados

tolerancia_teta = 0.001;
ganho = 1000; % Ganho da etapa de amplificação
I_inj = 10*10^-3; % [A]
Tamb = 25; % [Celsius]
L_total = 0.02; % [m]

numero_passos_velocidade = 1; % Número de passos de cálculo
numero_passos_espessura = 800; % Número de passos de cálculo
numero_passos_L = 20;

d = 25 * 10^(-6); % Diâmetro do sensor [m]

delta_inicial = 0*10^-6; % Espessura [m]
delta_final = 5*10^-6; % Espessura [m]

L_suporte_inicial = 1*10^-3; %[m]

L_depositado_final = L_total / 3; %[m]
L_suporte_final = L_depositado_final; %[m]
L_depositado_inicial = L_suporte_inicial;

% Propriedades do fluido

u1 = 0.20; % Velocidade 1 [m/s]
u2 = 0.21; % Velocidade 2 [m/s]

```

```

densidade_do_ar = 1.1614;
viscosidade_cinematica_ar = 1.84*10^-5;
condutividade_termica_ar = 26.3*10^-3;

```

```

C = 0.75;
m = 0.4;
n = 0.37;
Pr = 0.71;

```

```
% Propriedades dos materiais
```

```

a_depositado = 2.76*10^-6; %[V/K]
b_depositado = 1.22*10^-8; %[V/K]

```

```

a_fio = -38.1*10^-6; %[V/K^2]
b_fio = -8.98*10^-8; %[V/K^2]

```

```

lambda_fio = 19.5; %[W/(m.K)]
lambda_depositado = 401; %[W/(m.K)]

```

```

sigma_depositado = 59.1716*10^6; % [S/m]
sigma_fio = 1.923*10^6; % [S/m]

```

```

ro_fio = 52*10^-8; %[Ohm.metro]
ro_depositado = 1.69*10^-8; %[Ohm.metro]

```

```
% Cálculos para u1
```

```

h1 = (C * ((densidade_do_ar * u1 * d) / viscosidade_cinematica_ar)^m * (Pr^n) *
                                             condutividade_termica_ar) / d;

```

```
h = h1;
```

```
% Geração do vetor espessura do depósito
```

```

passo_espessura = (delta_final-delta_inicial) / numero_passos_espessura;

for contador = 0:numero_passos_espessura
    delta(contador + 1) = delta_inicial + passo_espessura*contador;
end

% Cálculo das áreas

A_fio = (pi*d^2)/4;

[A_depositado] = area_deposito(d, delta);

% Geração do vetor alfa equivalente

alfa_fio_Tamb = a_fio + b_fio*(Tamb); %[V/C]
alfa_depositado_Tamb = a_depositado + b_depositado*(Tamb); %[V/C]

for contador = 1: length(A_depositado)
    alfa_eq_Tamb(contador) = (alfa_fio_Tamb * A_fio * sigma_fio +
                             alfa_depositado_Tamb * A_depositado(contador)
                             * sigma_depositado) / (sigma_fio * A_fio +
                             sigma_depositado * A_depositado(contador));
end

% Determinação da condutividade térmica

[lambda_eq] = condutividade_termica(lambda_fio, lambda_depositado, A_fio,
                                     A_depositado);

passo_L = (L_suporte_final-L_suporte_inicial) / numero_passos_L;

contador = 0;
contador2 = 0;

```

```

while (L_suporte_inicial + passo_L*contador) <= (L_suporte_final)
    contador2 = 0;
    for contador2 = 0:numero_passos_L
        L_suporte(contador + 1, contador2 + 1) = L_suporte_inicial + passo_L * contador;
        L_depositado(contador + 1, contador2 + 1) = L_depositado_inicial + passo_L *
            contador2;

        [teta_juncao_q, alfa_eq_q, alfa_fio_q, q_Peltier_q, teta_juncao_f, alfa_eq_f,
        alfa_fio_f, q_Peltier_f] = efeito_peltier(A_fio, A_depositado, a_fio, a_depositado,
            b_fio, b_depositado, I_inj, h,
            L_depositado(contador + 1, contador2 + 1),
            L_suporte(contador + 1, contador2 + 1),
            lambda_fio, lambda_eq, sigma_fio,
            sigma_depositado, delta, d, Tamb,
            tolerancia_teta);

        [V_Seeb] = efeito_seebeck(alfa_fio_Tamb, alfa_eq_Tamb, teta_juncao_q,
            teta_juncao_f);

        V_Seeb_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1) = max(V_Seeb);

        contador3 = 1;
        while V_Seeb(contador3) < V_Seeb_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1)
            delta_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1) = delta(contador3);
            q_Peltier_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1) = q_Peltier_q(contador3) -
                q_Peltier_f(contador3);

            contador3 = contador3 + 1;
        end

        razao_L_depositado_L_suporte(contador + 1, contador2 + 1) =
            L_depositado(contador + 1, contador2 + 1) / L_suporte(contador + 1, contador2 + 1);

        comprimento_celula(contador + 1, contador2 + 1) =

```

```

L_depositado(contador + 1, contador2 + 1) + L_suporte(contador + 1, contador2 + 1);

numero_celulas(contador + 1, contador2 + 1) = (L_total * 1000 -
        L_depositado(contador + 1, contador2 + 1) * 1000) /
        (comprimento_celula(contador + 1, contador2 + 1)*1000);

V_Seeb_total(contador + 1, contador2 + 1) = numero_celulas(contador + 1, contador2
        + 1) * V_Seeb_L1_L2(contador + 1,
        contador2 + 1);

R_suporte = (numero_celulas(contador + 1, contador2 + 1) * (4/pi) * ro_fio *
        L_suporte(contador + 1, contador2 + 1)) / (d^2);

R_depositado = ((numero_celulas(contador + 1, contador2 + 1) + 1) * (4/pi) * ro_fio *
        ro_depositado * L_depositado(contador + 1, contador2 + 1)) /
        (ro_depositado * (d^2) + 4*ro_fio*delta_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1) *
        (delta_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1) + d));

Rs(contador + 1, contador2 + 1) = R_suporte + R_depositado;

q_Joule(contador + 1, contador2 + 1) = (I_inj^2)*Rs(contador + 1, contador2 + 1);

contador2 = contador2 + 1;
end

L_suporte(contador + 1, contador2) / L_suporte_final*100 % Indica a progressão das
        iterações

contador = contador + 1;
end

tamanho = size(L_suporte);

% Determinação do incremento na temperatura média do sensor devido ao efeito Joule
for linha = 1:tamanho(1)

```

```

for coluna = 1:tamanho(2)
    Area_superficial_media(linha, coluna) = pi * (d * L_suporte(linha, coluna) *
        numero_celulas(linha, coluna) + (d + delta_L1_L2(linha, coluna)) *
        L_depositado(linha, coluna) * (numero_celulas(linha, coluna) + 1));

    delta_temp(linha, coluna) = q_Joule(linha, coluna) / (h *
        Area_superficial_media(linha, coluna));
end
end

% Cálculos para u2

h2 = (C * ((densidade_do_ar * u2 * d) / viscosidade_cinematica_ar)^m * (Pr^n) *
    condutividade_termica_ar) / d;

h = h2;

for contador = 0:tamanho(1) - 1
    for contador2 = 0:tamanho(2) - 1
        [A_depositado] = area_deposito(d, delta_L1_L2(contador + 1, contador2 + 1));
        [lambda_eq] = condutividade_termica(lambda_fio, lambda_depositado, A_fio,
            A_depositado);

        alfa_eq_Tamb = (alfa_fio_Tamb * A_fio * sigma_fio + alfa_depositado_Tamb *
            A_depositado * sigma_depositado) / (sigma_fio * A_fio + sigma_depositado *
            A_depositado);

        [teta_juncao_q, alfa_eq_q, alfa_fio_q, q_Peltier_q, teta_juncao_f, alfa_eq_f, alfa_fio_f,
            q_Peltier_f] = efeito_peltier(A_fio, A_depositado, a_fio, a_depositado, b_fio,
                b_depositado, I_inj, h, L_depositado(contador + 1, contador2 + 1),
                L_suporte(contador + 1, contador2 + 1), lambda_fio, lambda_eq,
                sigma_fio, sigma_depositado, delta_L1_L2(contador + 1, contador2
                    + 1), d, Tamb, tolerancia_teta);
    end
end

```

```

[V_Seeb] = efeito_seebeck(alfa_fio_Tamb, alfa_eq_Tamb, teta_juncao_q,
                          teta_juncao_f);

V_Seeb_total_u2(contador + 1, contador2 + 1) = numero_celulas(contador + 1,
                                                                contador2 + 1)*V_Seeb;

V_Seeb_u2(contador + 1, contador2 + 1) = V_Seeb;

end
end

for linha = 1:tamanho(1)
    for coluna = 1:tamanho(2)
        sensibilidade(linha, coluna) = (V_Seeb_total(linha, coluna) - V_Seeb_total_u2(linha,
                                                                                          coluna))/(u2 - u1);

        delta_temp_u2(linha, coluna) = q_Joule(linha, coluna)/(h*Area_superficial_media(linha,
                                                                                          coluna));

        sensibilidade_temp(linha, coluna) = (delta_temp(linha, coluna) - delta_temp_u2(linha,
                                                                                          coluna))/(u2 - u1);

        Beta(linha, coluna) = sensibilidade(linha, coluna)/(sensibilidade_temp(linha, coluna));
    end
end

figure(1);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000, L_depositado*1000, Beta*1000000);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('Beta [V/Celsius]');

figure(2);

```

```

colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000,L_depositado*1000,sensibilidade*1000000);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('sensibilidade [uV/(m/s)]');

```

```

figure(3);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000, L_depositado*1000,q_Joule*1000);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('q_{Joule} [mW]');

```

```

figure(4);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000, L_depositado*1000,V_Seeb_total*1000000);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('V_{sensor} [uV]');

```

```

figure(5);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000, L_depositado*1000,delta_temp);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('Delta T_{sensor}');

```

```

figure(6);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*1000,L_depositado*1000,sensibilidade_temp);
xlabel('L_{suporte} [mm]');
ylabel('L_{depositado} [mm]');
zlabel('sensibilidade_{Tsensor} [Celsius/(m/s)]');

```



```
figure(7);
colormap([0.5 0.5 0.5]);
surf(L_suporte*10^3, L_depositado*10^3, delta_L1_L2*10^6);
xlabel('L suporte [mm]');
ylabel('L depósito [mm]');
zlabel('Espessura ótima do depósito [microns]');
```

- **Sub-rotina para a determinação da condutividade térmica equivalente**

```
function [lambda] = condutividade_termica(lambda_n_depositado, lambda_depositado,
                                          area_n_depositado, area_depositado)
```

```
% Função que calcula a condutividade térmica de um material
```

```
%
```

```
% Utilização:
```

```
%
```

```
% [lambda] = condutividade_termica(lambda_n_depositado, lambda_depositado,
                                     area_n_depositado, area_depositado);
```

```
%
```

```
% Observação: area_depositado pode ser um vetor
```

```
for contador = 1:length(area_depositado)
```

```
    lambda(contador) = (lambda_n_depositado * area_n_depositado + lambda_depositado *
                        area_depositado(contador)) / (area_n_depositado +
                        area_depositado(contador));
```

```
end
```

- **Sub-rotina para o cálculo do efeito Peltier**

```
function [teta_juncao_q, alfa_eq_q, alfa_n_depositado_q, q_Peltier_q, teta_juncao_f,
        alfa_eq_f, alfa_n_depositado_f, q_Peltier_f] =
    efeito_peltier(area_n_depositado, area_depositado, a_n_depositado, a_depositado,
        b_n_depositado, b_depositado, I_inj, h, l_depositado, l_n_depositado,
        lambda_n_depositado, lambda_depositado, sigma_n_depositado,
```

```

sigma_depositado, delta, diametro_fio, Tamb, tolerancia_teta)

% Função que calcula o incremento (ou decremento) de temperatura, provocado por efeito
% Peltier, na junção de dois materiais
%
% Utilização:
%
% [teta_juncao_q, alfa_eq_q, alfa_n_depositado_q, q_Peltier_q, teta_juncao_f, alfa_eq_f,
    alfa_n_depositado_f, q_Peltier_f] =
efeito_peltier(area_n_depositado, area_depositado, a_n_depositado, a_depositado,
               b_n_depositado, b_depositado, I_inj, h, l_depositado, l_n_depositado,
               lambda_n_depositado, lambda_depositado, sigma_n_depositado,
               sigma_depositado, delta, diametro_fio, Tamb, tolerancia_teta);
%
% Observação: h, area_depositado e alfa_depositado podem ser um vetores

for contador2 = 1:length(h)
    for contador = 1:length(delta)

        % Cálculo para teta positivo
        teta_juncao_q(contador, contador2) = 0;
        erro = 1;

        while erro > tolerancia_teta;
            T_juncao = Tamb + 273.15 + teta_juncao_q(contador, contador2);

            % Determinação do poder termoelétrico

            alfa_n_depositado_q(contador, contador2) = a_n_depositado + b_n_depositado *
                                                         (T_juncao - 273.15); %[V/C]

            alfa_depositado = a_depositado + b_depositado*(T_juncao - 273.15); %[V/C]
        end
    end
end

```

```

alfa_eq_q(contador, contador2) = (alfa_n_depositado_q(contador, contador2) *
                                   area_n_depositado*sigma_n_depositado +
                                   alfa_depositado * area_depositado(contador) *
                                   sigma_depositado) / (sigma_n_depositado *
                                   area_n_depositado + sigma_depositado *
                                   area_depositado(contador));

q_Peltier_q(contador, contador2) = (alfa_eq_q(contador, contador2) -
                                     alfa_n_depositado_q(contador, contador2)) *
                                     (T_juncao) * I_inj;

% Determinação do teta

m_n_depositado = sqrt((4*h(contador2))/(lambda_n_depositado*diametro_fio));

m_depositado = sqrt((4*h(contador2))/(lambda_depositado(contador)*(diametro_fio +
2*delta(contador))));

k1 = (pi/2)*sqrt(h(contador2)*lambda_n_depositado*((diametro_fio)^3));

k2 = tanh((m_n_depositado*l_n_depositado)/2);

k3 = pi * sqrt(h(contador2) * lambda_depositado(contador) * delta(contador) *
              (diametro_fio + delta(contador)) * (diametro_fio + 2 * delta(contador)));
k4 = tanh((m_depositado*l_depositado)/2);

teta_juncao_q(contador, contador2) = (q_Peltier_q(contador, contador2) / (k1/k2 +
k3/k4));

erro = abs(abs(teta_juncao_q(contador, contador2) + Tamb + 273.15) -
          abs(T_juncao));

end

% Cálculo para teta frio

```

```
teta_juncao_f(contador, contador2) = 0;
```

```
erro = 1;
```

```
while erro > tolerancia_teta;
```

```
    T_juncao = Tamb + 273.15 + teta_juncao_f(contador, contador2);
```

```
% Determinação do poder termoelétrico
```

```
alfa_n_depositado_f(contador, contador2) = a_n_depositado + b_n_depositado *  
                                            (T_juncao - 273.15); %[V/C]
```

```
alfa_depositado = a_depositado + b_depositado*(T_juncao - 273.15); %[V/C]
```

```
alfa_eq_f(contador, contador2) = (alfa_n_depositado_f(contador, contador2) *  
                                   area_n_depositado * sigma_n_depositado +  
                                   alfa_depositado * area_depositado(contador) *  
                                   sigma_depositado) / (sigma_n_depositado *  
                                   area_n_depositado + sigma_depositado *  
                                   area_depositado(contador));
```

```
q_Peltier_f(contador, contador2) = (alfa_n_depositado_f(contador, contador2) -  
                                     alfa_eq_f(contador, contador2))*(T_juncao)*I_inj;
```

```
% Determinação do teta
```

```
m_n_depositado = sqrt((4*h(contador2)) / (lambda_n_depositado*diametro_fio));  
m_depositado = sqrt((4*h(contador2)) / (lambda_depositado(contador) *  
(diametro_fio + 2 * delta(contador))));
```

```
k1 = (pi/2)*sqrt(h(contador2) * lambda_n_depositado * ((diametro_fio)^3));
```

```
k2 = tanh((m_n_depositado * l_n_depositado)/2);
```

```
k3 = pi * sqrt(h(contador2) * lambda_depositado(contador) * delta(contador) *
```

```

(diametro_fio + delta(contador)) * (diametro_fio + 2 * delta(contador)));

k4 = tanh((m_depositado*l_depositado)/2);

teta_juncao_f(contador, contador2) = (q_Peltier_f(contador, contador2) / (k1/k2 +
k3/k4));

erro = abs(abs(teta_juncao_f(contador, contador2) + Tamb + 273.15) -
abs(T_juncao));
end
end
end

```

- Sub-rotina para o cálculo do efeito Seebeck

```

function [V_Seeb] = efeito_seebeck(alfa_n_depositado_Tamb, alfa_eq_Tamb,
teta_juncao_q, teta_juncao_f)

% Função que calcula a tensão produzida por efeito Seebeck (sem considerar a inversão de
% corrente)
%
% Utilização:
%
% [V_Seeb] = efeito_seebeck(alfa_n_depositado_Tamb, alfa_eq_Tamb, teta_juncao_q,
teta_juncao_f);
%
% Observação: alfa_n_depositado_Tamb, teta_juncao_q, teta_juncao_f podem ser vetores

tamanho_matriz = length(teta_juncao_q);

for contador = 1:length(teta_juncao_q);
V_Seeb(contador) = (alfa_eq_Tamb(contador) - alfa_n_depositado_Tamb) *
(teta_juncao_q(contador) - teta_juncao_f(contador));
end

```

Anexo 3 - Comunicação entre o anemômetro e o PC

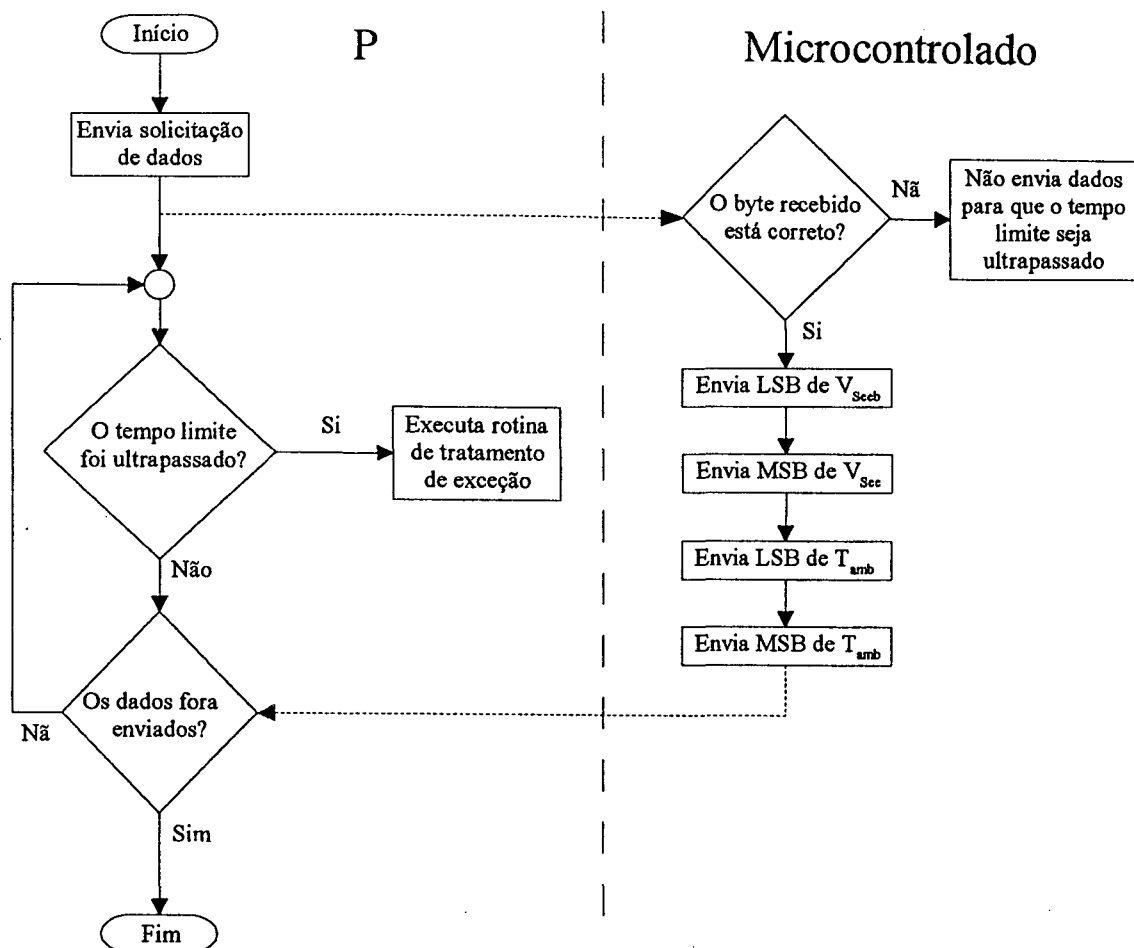


Figura 72: Diagrama da comunicação entre o anemômetro e o PC

A comunicação entre o protótipo montado e um micro do tipo PC foi baseada em uma conexão RS-232. O protocolo utilizado para tanto é bastante simples; periodicamente o PC envia um byte solicitando dados. Isso gera uma interrupção no microcontrolador e a rotina de tratamento dessa interrupção faz o microcontrolador enviar os bytes de dados para o PC. Essa operação possui um tempo limite para ser executada, sendo que a contagem desse tempo é feita após o envio do pacote de solicitação de dados. Caso esse tempo limite seja ultrapassado o PC executa uma rotina de tratamento de exceção. Esse método proporciona uma forma de detectar eventuais problemas com o anemômetro ou com o canal de transmissão.

Além do PC verificar a existência de erros de transmissão, o microcontrolador também o faz verificando se o byte de solicitação de dados está correto; caso não esteja, nenhum dado é enviado.

Sendo assim o PC será informado sobre o erro quando o tempo limite for ultrapassado.

Para que a comunicação seja realizada, a velocidade de transmissão deve ser a mesma para o microcontrolador e o PC. Além disso os seguintes parâmetros devem ser obedecidos:

- Número de bits por caracter: 8;
- Bits de parada: 1;
- Sem verificação de paridade.

Anexo 4 - Códigos para o microcontrolador ATmega 103

Os códigos utilizados para o microcontrolador foram escritos em linguagem C e compilados através do compilador *gcc* versão 2.95.2, liberado sob a licença GNU (www.gnu.org). Trata-se de uma versão portada para windows e específica para os microcontroladores da ATMEL e é disponibilizado através da internet no endereço <http://8bit.at/avr>.

• Rotina principal

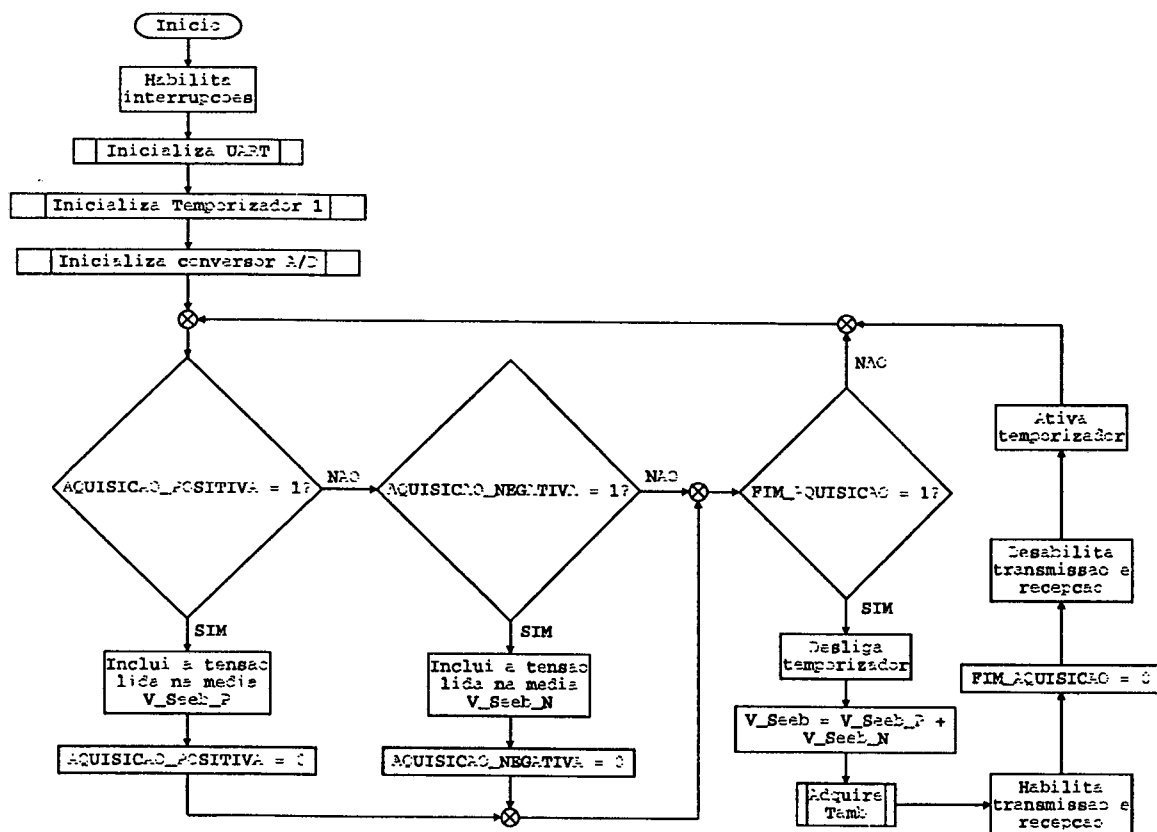


Figura 73: Rotina principal

* Programação do ATmega para o Anemômetro a Efeito Peltier */

/* Autor: Carlos Eduardo Paghi */

/* LMPT - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais - EMC */

/* LCI - Laboratório de Circuitos Integrados - EEL */

/* Orientadores:

Marcio Cherem Schneider

Saulo Güths */

/* Observações:

- a opção -O3 foi retirada do makefile, devido a problemas de alocação de variáveis

/* Bibliotecas utilizadas */

#include <io.h>

#include <stdlib.h>

#include <interrupt.h>

#include <signal.h>

#include <iom103.h>

/* Protótipos de funções */

#ifdef trans_serial

void uart_init(void);

void uart_send(void);

#endif

void read_ad(int);

void init_ad(void);

/* Definições */

#define valor_UBRR 0x0C

#define canal_V_Seab 0

#define canal_Tamb 1

#define atraso_glitch 2

```

#define inicio_aquisicao 322
#define fim_ciclo 322

/* Declaração das variáveis globais */

unsigned int V_Seeb_P = 0;
unsigned int V_Seeb_N = 0;
unsigned int V_Seeb = 0;
unsigned int Tamb = 0;

unsigned int contador_pulsos = 0;
unsigned int aquisicao_positiva = 0;
unsigned int aquisicao_negativa = 0;
unsigned int fim_aquisicao = 0;

int byte_enviado[4];
int contador, contador_UART, pacote_enviado;

/* Função principal */

int main( void )
{
    int temp;
    unsigned int Temp1, Temp2;
    unsigned long int contador_amostras;

    sei(); /* Habilita interrupções */

    #ifdef trans_serial
    uart_init(); /* Inicializa UART */
    #endif

    inicializa_timers();
    init_ad();

```

```

/* Laço infinito */

while(1)
{
    if (aquisicao_positiva == 1)
    {
        contador_amostras = contador_pulsos + 1 - inicio_aquisicao;

        Temp1 = inp(ADCL);
        Temp2 = inp(ADCH);
        Temp2 = Temp2 << 8;
        V_Seab_P = Temp2 | Temp1;

        aquisicao_positiva = 0;
    }

    if (aquisicao_negativa == 1)
    {
        contador_amostras = contador_pulsos + 1 - inicio_aquisicao;

        Temp1 = inp(ADCL);
        Temp2 = inp(ADCH);
        Temp2 = Temp2 << 8;
        V_Seab_N = Temp2 | Temp1;

        aquisicao_negativa = 0;
    }

    if (fim_aquisicao == 1)
    {
        /* Para o Timer 1 */
        temp = inp(TCCR1B);
        temp = temp & 0xF0;
    }
}

```

```

outp(temp, TCCR1B);

/* Zera contador */
outp(0x00, TCNT1H);
outp(0x00, TCNT1L);

V_Seeb = V_Seeb_P + V_Seeb_N;
/* Aquisição de Tamb */

read_ad(canal_Tamb);
Temp1 = inp(ADCL);
Temp2 = inp(ADCH);
Temp2 = Temp2 << 8;
Tamb = Temp2 | Temp1;

/* Habilita Rx/D/TxD e habilita interrupções da UART */
outp((1<<RXCIE)|(1<<TXCIE)|(1<<RXEN)|(1<<TXEN),UCR);

fim_aquisicao = 0;

/* Habilita Rx/D/TxD e desabilita interrupções da UART */
outp((0<<RXCIE)|(0<<TXCIE)|(1<<RXEN)|(1<<TXEN),UCR);

/* Ativa o Timer 1 (Clock/8) */
temp = inp(TCCR1B);
temp = temp & 0xF0;
temp = temp | 0x02;
outp(temp, TCCR1B);
}
}
}

```

- Rotina para inicialização da UART

/* Sub-rotina para inicialização da UART */

```
void uart_init(void)
{
    /* Habilita RxD/TxD e desabilita interrupções */
    outp(((0<<RXCIE)|(0<<TXCIE)|(1<<RXEN)|(1<<TXEN),UCR);
    /* Seta o baud rate */
    outp(valor_UBRR, UBRR);
}
```

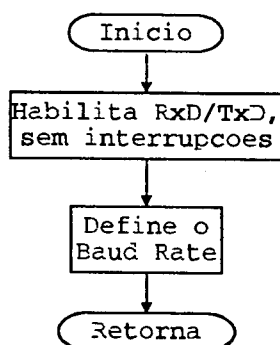


Figura 74: Rotina de inicialização da UART

- Rotina para inicialização do temporizador

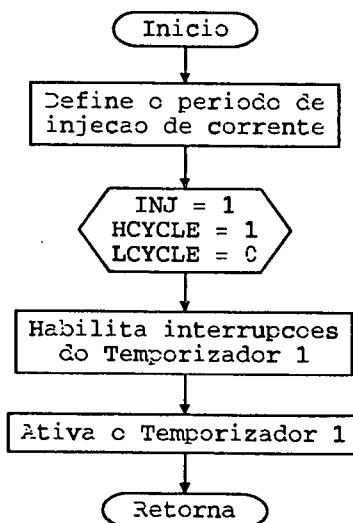


Figura 75: Rotina para inicialização do temporizador

/ Sub-rotina para inicialização dos Timers */*

```
void inicializa_timers(void)
```

```
{
```

```
    int temp;
```

/ Inicialização do Timer 1 */*

/ Define o período de injeção de corrente */*

```
    outp(0x01, OCR1AH);
```

```
    outp(0x40, OCR1AL);
```

/ Ativa a linha PD5 e PD6 e desativa a linha PD7 */*

```
    outp(0xFF, DDRD);
```

```
    outp(0x60, PORTD);
```

/ Ativa o bit OCIE1A */*

```
    temp = inp(TIMSK);
```

```
    temp = temp & 0x67;
```

```
    temp = temp | 0x10;
```

```
    outp(temp, TIMSK);
```

/ Ativa o Timer 1 (Clock/8) */*

```
    temp = inp(TCCR1B);
```

```
    temp = temp & 0xF0;
```

```
    temp = temp | 0x02;
```

```
    outp(temp, TCCR1B);
```

```
}
```

- **Rotina para inicialização do conversor A/D**

/ Sub-rotina para inicialização do conversor A/D */*

```
void init_ad(void)
```

```

{
    outp(0x85, ADCSR);
}

```

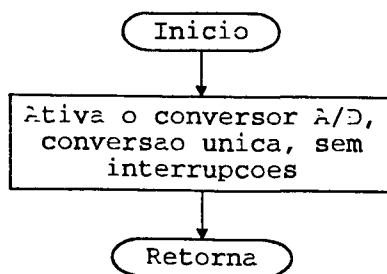


Figura 76: Rotina para
inicialização do conversor A/D

- **Tratamento da interrupção gerada pelo temporizador**

```

SIGNAL(SIG_OUTPUT_COMPARE1A)

```

```

{
    int temp, temp2, ciclo;

```

```

    cli();

```

```

    /* Pára o Timer 1 */

```

```

    temp = inp(TCCR1B);

```

```

    temp = temp & 0xF0;

```

```

    outp(temp, TCCR1B);

```

```

    /* Zera contador */

```

```

    outp(0x00, TCNT1H);

```

```

    outp(0x00, TCNT1L);

```

```

    /* Guarda ciclo */

```

```

    ciclo = inp(PORTD);

```

```

    temp = ciclo & 0x3F;

```

```

    outp(temp, PORTD);

```

```

/* Delay para evitar glitches */
temp = 0;
while (temp <= atraso_glitch)
{
    temp++;
}

/* Corta injeção de corrente */
temp = inp(PORTD) & 0x1F;
outp(temp, PORTD);

if (contador_pulsos >= inicio_aquisicao)
{
    /* Delay para evitar glitches */
    temp = 0;
    while (temp <= atraso_glitch)
    {
        temp++;
    }

    /* Verifica se deve adquirir o pulso negativo ou o positivo */
    temp = ciclo;
    temp = temp & 0x40;

    if (temp==0x40)
    {
        read_ad(canal_V_Seeb);          /* Aquisição positiva */
        aquisicao_positiva = 1;
    }
    else
    {
        read_ad(canal_V_Seeb);          /* Aquisição negativa */
        aquisicao_negativa = 1;
    }
}

```



```
}  
else  
{  
    /* Delay para equivalência dos laços */  
    temp = 0;  
    while (temp <= 28)  
    {  
        temp++;  
    }  
}  
  
if (contador_pulsos == fim_ciclo)  
{  
    /* Verifica se a aquisição dos ciclos positivo e negativo foram efetuadas */  
    if (aquisicao_negativa == 1)  
    {  
        fim_aquisicao = 1;  
    }  
    else  
    {  
        temp = 0; /* Atraso para equivalência dos ciclos */  
    }  
  
    /* Inverte as linhas PD6 e PD7 */  
    temp = ciclo;  
    temp2 = temp & 0x3F;  
    temp = ~temp;  
    temp = temp & 0xC0;  
    temp = temp | temp2;  
    ciclo = temp;  
    contador_pulsos = 0;  
}
```

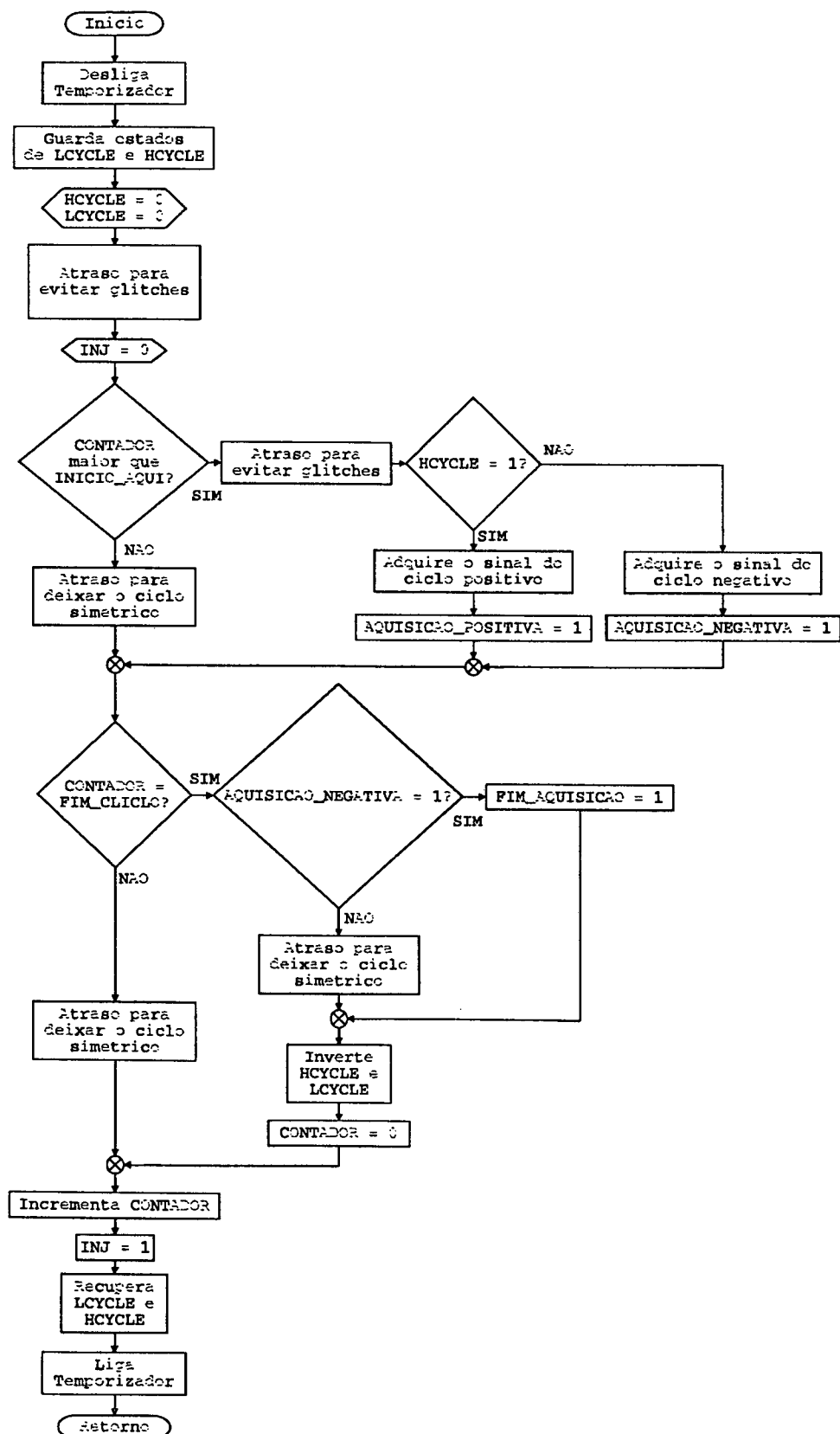


Figura 77: Tratamento da interrupção gerada pelo temporizador

```
else
{
    /* Delay para equivalência dos laços */
    temp = 0;
    while (temp <= 02)
    {
        temp++;
    }

    contador_pulsos++;
}

/* Ativa PD5 */
temp = inp(PORTD) | 0x20;
outp(temp, PORTD);

/* Delay para evitar glitches */
temp = 0;
while (temp <= atraso_glitch)
{
    temp++;
}

/* Recupera PD6 e PD7*/
ciclo = ciclo | 0x20;
outp(ciclo, PORTD);

sei();

/* Ativa o Timer 1 (Clock/8) */
temp = inp(TCCR1B);
temp = temp & 0xF0;
temp = temp | 0x02;
```

```

    outp(temp, TCCR1B);
}

```

- Tratamento da interrupção gerada pela recepção de um byte

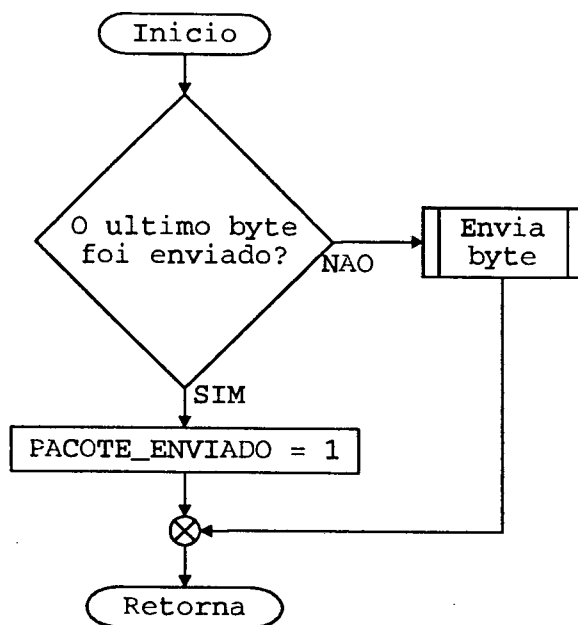


Figura 78: Tratamento da interrupção gerada pela recepção de um byte

```
/* Tratamento da interrupção de byte recebido */
```

```
SIGNAL(SIG_UART_RECV)
```

```
{
```

```
    int byte_recebido;
```

```
    unsigned int Temp2;
```

```
    byte_recebido = inp(UDR);
```

```
    if (byte_recebido == 0x55)
```

```
    {
```

```
        Temp2 = V_Seeb;
```

```
        Temp2 = Temp2 >> 8;
```

```
        /* Separa o MSB */
```

```

byte_enviado[1] = Temp2;
byte_enviado[0] = V_Seeb; /* Separa o LSB */

uart_send();
}
}

```

- Tratamento da interrupção gerada pelo envio de um byte

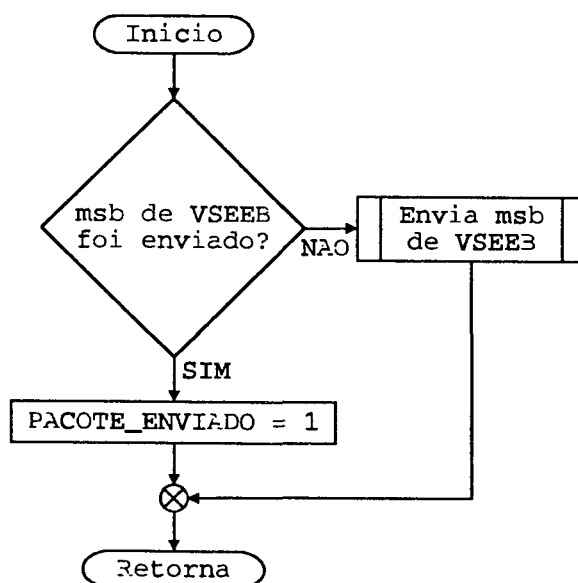


Figura 79: Tratamento da interrupção gerada pelo envio de um byte

/* Tratamento da interrupção de byte enviado */

```

SIGNAL(SIG_UART_TRANS)
{
    contador_UART++;
    if (contador_UART <= 3)
    {
        outp(byte_enviado[contador_UART], UDR);
    }
    else

```

```

{
    pacote_enviado = 0x01;
}
}

```

- Sub-rotina para leitura do conversor A/D

```
/* Sub-rotina para leitura do conversor A/D */
```

```

void read_ad(int canal)
{
    outp(canal, ADMUX);
    sbi(ADCSR, ADSC);
    loop_until_bit_is_set(ADCSR, ADIF);
    cbi(ADCSR, ADIF);
}

```

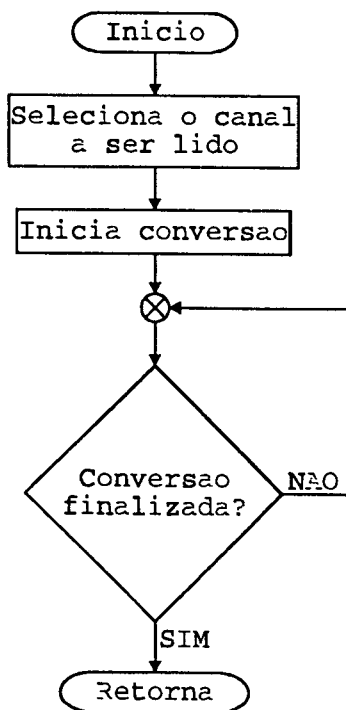


Figura 80: Sub-rotina para leitura do conversor A/D

- Sub-rotina para enviar bytes

```
/* Sub-rotina para envio de pacotes */
```

```
void uart_send(void)
```

```
{
```

```
    contador_UART = 0;
```

```
    pacote_enviado = 0x00;
```

```
    outp(byte_enviado[contador_UART], UDR); /* Envia o primeiro byte */
```

```
    sei();
```

```
    while (pacote_enviado != 0x01){} /* Aguarda a ocorrência de interrupções de byte  
                                     enviado */
```

```
}
```

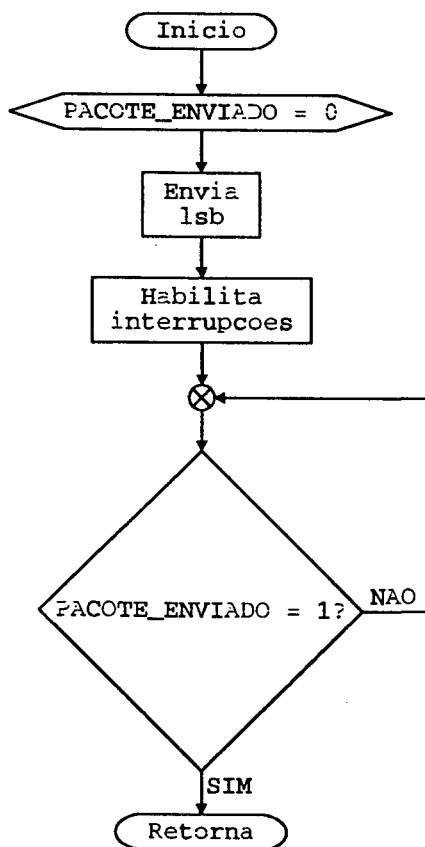


Figura 81: Sub-rotina para enviar bytes

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GÜTHS, Saulo. *Anemomètre à effet Peltier et fluxmètre thermique. Conception et realization. Application a l'etude de la convection naturelle*. Tese de doutorado. L'Université D'Artois, Fr, 1994.
- [2] TURNER, J. D. *Instrumentation for Engineers*. Ed. MacMillan Education LTD. 1988. p. 13 – 157.
- [3] DELMEÉ, G. J. *Manual de Medição e Vazão*. Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1989. p. 263 – 406.
- [4] SARMA, G. R., Analysis of a Constant Voltage Anemometer. In: IMCT'93- INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE. *Proccedings*. 1993, pp 731-736.
- [5] FREYMUTH, P., 1967, Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers. *The Review os Scientific Instruments*, Vol. 38, No. 5, p. 677-681.
- [6] OLIVEIRA, A., FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S. et al. A Digital Anemometer with PWM Excitation. In: IECON'95-INT. CONF., INDUSTRIAL ELECTRONIC, CONTROL AND INSTRUMENTATION. *Proccedings*. 1995, p. 893-897.
- [7] CHARTIER, P., GROSS, M., SPIGLER, et al. Application de la thermodynamique du non équilibre. *Effets thermoelétriques – Couplage du courant de matière*. Ed. Masson, 1971. p. 154-163.
- [8] LECLERQ, D., *Contribution à l'étude de l'effet Peltier dans les circuits bimétalliques à électrodes plaquées. Application à la conception de nouveaux capteurs*. Tese de doutorado. Université de Sc. et Tech. de Liller Flandres-Artois, 1991.
- [9] SCHIMIDT, Frank W., HENDERSON, Robert E., WOLGEMUTH, Carl H. *Introdução às Ciências Térmicas. Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*. Ed Edgard Blücher, São Paulo, 1996. p. 1-14.

- [10] GRAEME, Jerald G., *Applications of Operational Amplifiers - Third Generation Techniques*. Ed McGraw-Hill, 1973. p. 124-125.
- [11] SEDRA, Adel S., SMITH, Kenneth C., *Microeletrônica, Volume 1*. Ed McGraw-Hill, São Paulo, 1995. p. 55-64.
- [12] 8-bit AVR® Microcontroller with 64k/128k Bytes In-System Programmable Flash, Datasheet, <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2486.pdf> (6 março 2002).
- [13] ARPACI, V.S. *Conduction Heat Transfer*. Addison-Wesley Publishing Company, Califórnia, 1966.
- [14] INCROPERA, Frank P., WITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1992. p. 2-76.
- [15] ZHUKAUSKAS, A., Heat Transfer from Tubes in Cross Flow. In: J.P. Hurtnett and T.F. Irvine, Jr. , Eds., *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, Academic Press, New York, 1972.
- [16] CHURCHILL, S.W., BERNSTEIN, J.M., *Heat Transfer*, p. 99 - 300, 1977
- [17] PAGHI, C. E., GÜTHS, Um estudo sobre o circuito de detecção do efeito Seebeck no anemômetro a efeito Peltier. In: IWS'2001 VII WORKSHOP IBERCHIP. *Proccedings*. 2001 - Montevidéu - Uruguai, p. 31.
- [18] PAGHI, C. E., GÜTHS, Circuit Topologies for Peltier Effect Anemometer. In: XVI CONFERENCE OF THE BRAZILIAN MICROELECTRONICS SOCIETY. *Proccedings*. 2001 - Pirinópolis - Brasil, p. 93 - 97.
- [19] FERREIRA, R. P. C., FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S. et al. Hot-Wire Anemometer With Temperature Compensation Using Only One Sensor. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. USA: , v.50, n.4, p.954 - 958, 2001.